

Н.А. Амирханова, В.А. Белоногов, Г.У. Белоногова

ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЕ ПОЛИРОВАНИЕ МЕДИ И ЕЕ СПЛАВОВ

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

Введение

Обработку электропроводных материалов в разбавленных растворах солей и щелочей при наложении высоких напряжений (90–400В) в условиях существования вокруг рабочего электрода парогазовой оболочки (ПГО) используют для закалки, азотирования, цементации и других способов термической и химико-термической обработки ([1–4] и др.). При этом высокая скорость обработки, относительная дешевизна оборудования и электролитов придают этому методу существенные преимущества по сравнению с традиционными.

В 70-е годы В. Дураджи с сотрудниками впервые указали на возможность сглаживания микронеровностей поверхности при анодной обработке вольфрама при наличии парогазовой оболочки электрода [5]. Дальнейшие исследования полирования металлов и сплавов в электролитной плазме имели, в основном, патентный характер и посвящены решению задач оптимизации состава раствора и режима обработки различных металлов и сплавов [6–9]. Оптимизированы процессы электролитно-плазменной обработки нержавеющей стали [6, 10], меди и сплавов на ее основе [7]. Таким образом, исследования в области электролитно-плазменного полирования (ЭПП) находятся в настоящее время на стадии накопления фактического материала, хотя отдельные попытки выявления закономерностей процесса уже предпринимались. В работе [11] указывается на важную роль доли переменной составляющей в поляризующем напряжении при ЭПП. Отмечается также положительное влияние комплексообразующих добавок [8].

Методика эксперимента

Образцы представляли собой полоски толщиной 1 мм, шириной 7 мм, которые погружались в раствор на глубину 1 см. В некоторых случаях использовали цилиндрические образцы диаметром 2 мм, также погруженные в раствор на глубину 1 см. В качестве рабочих растворов использовали разбавленные (2–10%) растворы солей некоторых неорганических, а также низших карбоновых кислот. В некоторых случаях использовали добавки комплексообразователей (Трилон Б). В качестве источника поляризующего напряжения использовался трехфазный выпрямитель содержащий LC-фильтр, позволяющий получать выходное напряжение от 0 до 500 В с долей переменной составляющей менее 2%. Степень сглаживания поверхности определяли по высоте микронеровностей поверхности (R_a), измеряемой профилометром 170622. Блеск поверхности обработанных образцов оценивали визуально. Выход по току процесса растворения определяли гравиметрически. При этом процесс ионизации компонентов сплавов (Zn, Ni, Cu) рассматривался как двухэлектронный. Количество электричества определяли графическим интегрированием кривых ток – время.

Результаты и обсуждение

Настоящая работа посвящена исследованию процесса электролитно-плазменной обработки (ЭПО) меди и некоторых сплавов на ее основе (латунь и нейзильбер) с целью выявления влияния различных факторов на сглаживание микронеровностей поверхности.

Для ЭПО используют ограниченный круг электролитов: карбонаты и гидрокарбонаты щелочных металлов, щелочи, сульфат аммония. Поэтому целесообразно выявить влияние природы и состава электролита на процессы, протекающие на аноде в широкой области напряжений. Исследована ЭПО в растворах неорганических солей (хлориды, сульфаты, фосфаты, нитраты), а также в солях низших карбоновых кислот (ацетаты).

На рис. 1 приведены вольтамперные кривые (ВАК) анодного поведения нейзильбера в растворах различных электролитов. Как видно из рис. 1, во всех изученных электролитах ВАК имеют идентичный вид.

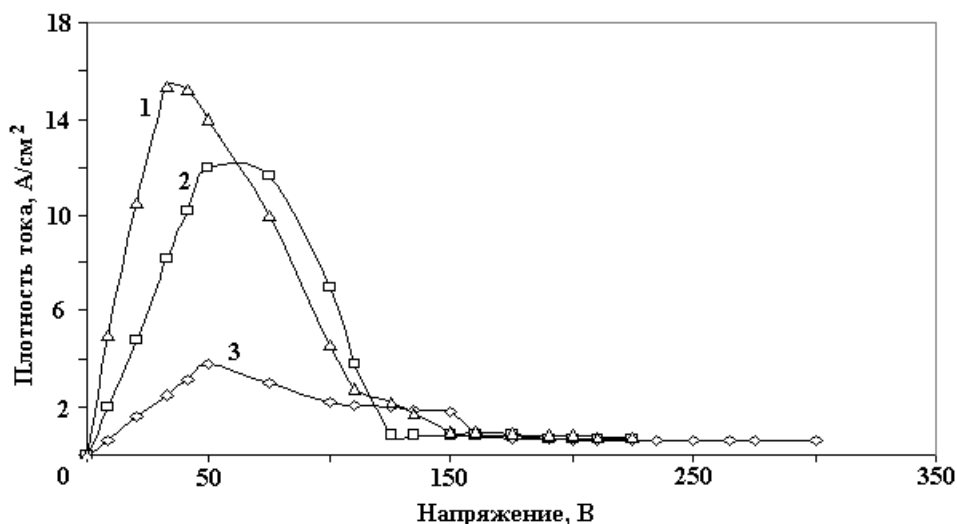


Рис. 1. ВАК анодного поведения нейзильбера в растворах: NH_4Cl , 4% (1); NH_4NO_3 , 4% (2); $(\text{NH}_4)_3\text{PO}_4$, 4% (3).

До напряжений 40–50 В происходит линейный рост тока, достигая в зависимости от раствора плотности тока 4–15 А на квадратный сантиметр геометрической поверхности анода. В области напряжений 50–150 В ток падает, при этом у поверхности рабочего электрода происходит периодическое образование ПГО и ее срыв, что сопровождается резкими изменениями тока. При дальнейшем увеличении напряжения выше 130–150 В плотность тока стабилизируется при значениях 0,5–0,8 А/см², не изменяясь вплоть до напряжений 400–450 В. Как видно из рис. 1, наибольшее влияние природы электролита сказывается на начальном участке ВАК. В растворе фосфата аммония плотность тока достигает максимального значения 4 А/см², в растворе нитрата аммония – 12 А/см², а в растворе хлорида аммония – 15 А/см². Аналогичная зависимость наблюдается также для латуни и меди.

В области напряжений, соответствующих начальному линейному участку ВАК, происходит активное растворение компонентов сплавов. В случае латуни и нейзильбера наблюдается селективное растворение более электроотрицательных компонентов (Zn, Ni). При этом используемые электролиты можно разделить на две группы. В растворах электролитов первой группы, содержащих анионы растворимых солей цинка, никеля и меди (Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-}), поверхностный слой обогащается медью, поверхность приобретает характерный для меди красный цвет. В растворах фосфатов, образующих вторую группу, на поверхности образуется налет нерастворимого в воде фосфата меди синего цвета, который, очевидно, пассивирует поверхность. Поэтому токи на этом участке ВАК в фосфатных электролитах значительно ниже.

Падающий участок ВАК соответствует периодическому образованию ПГО, при этом электрохимические процессы, протекающие в этой области напряжений, также зависят от природы электролита. В растворах электролитов первой группы на поверхности образцов образуется черный налет из-за окисления поверхностного слоя меди. В растворах фосфата аммония при напряжениях, соответствующих этому участку ВАК, происходит осыпание первоначально образующегося солевого слоя, в результате чего поверхность приобретает естественный для данного сплава цвет. Установлено, что нижняя граница напряжения устойчивости ПГО зависит от природы электролита и его концентрации. При концентрации электролита 4–5 масс.% ПГО стабилизируется в растворах хлоридов при 100 В, в нитратах, фосфатах, сульфатах – при 140–160 В, в то же время в растворе ацетата аммония даже при 300 В наблюдаются резкие скачки тока, связанные со срывом ПГО.

После стабилизации ПГО во всех растворах токи практически одинаковы, что свидетельствует о том, что основное падение напряжения происходит в ПГО и практически не зависит от природы электролита и электрода.

Выявлена еще одна зависимость ЭПО от природы электролита. В растворах электролитов первой группы в определенной области напряжений происходит сильный разогрев рабочего электрода. В растворе NH_4Cl концентрации 5 мас.% разогрев наблюдался при напряжениях выше 140 В, в нитратных растворах – выше 220 В, в растворе $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ – выше 260 В при той же концентрации раствора, в то же время в растворах фосфата аммония разогрева электрода не наблюдалось во всей области напряжений.

Влияние состава сплава на характер ВАК представлено на рис. 2, где приведены ВАК для меди, латуни и нейзильбера в растворе фосфата аммония.

Как видно из рис. 2, состав сплава сказывается на характере ВАК. Начальный участок ВАК, возможно, определяется ионизацией электроотрицательного компонента сплава (Zn). По мере увеличения содержания цинка токи растут, достигая максимального значения при меньших напряжениях. Токи на падающем участке ВАК, напротив, пропорциональны содержанию меди в сплаве, причем на ВАК в этой области отмечается характерная площадка предельного тока, наблюдаемая для всех изученных материалов. Характерно, что на ВАК исследованных сплавов в растворах электролитов первой группы подобных площадок не наблюдалось. Наличие площадки предельного тока связано с образованием пассивирующего слоя фосфата меди на поверхности обрабатываемых образцов, что подтверждается результатами экспериментов по изучению влияния кислотности среды на вольтамперные зависимости (рис. 3).

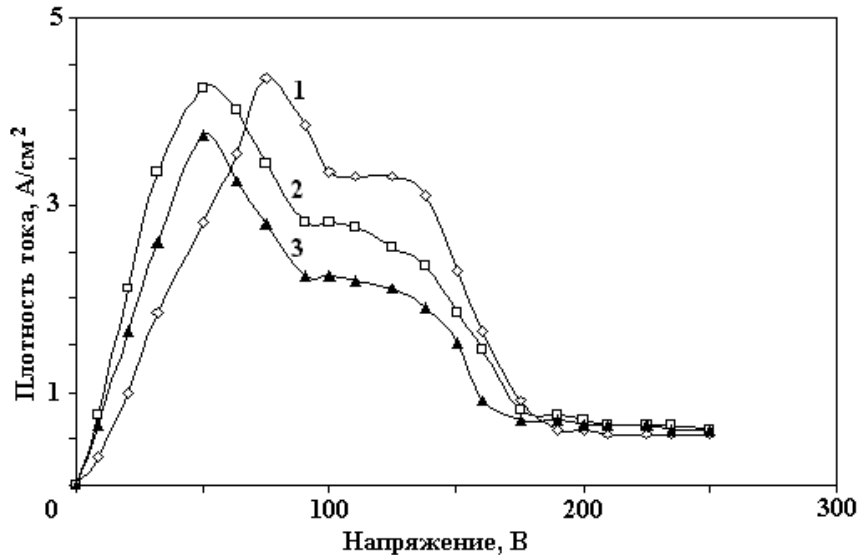


Рис. 2. Вольтамперные кривые анодного поведения меди (1), латуни (2), нейзильбера (3) в растворе фосфата аммония.

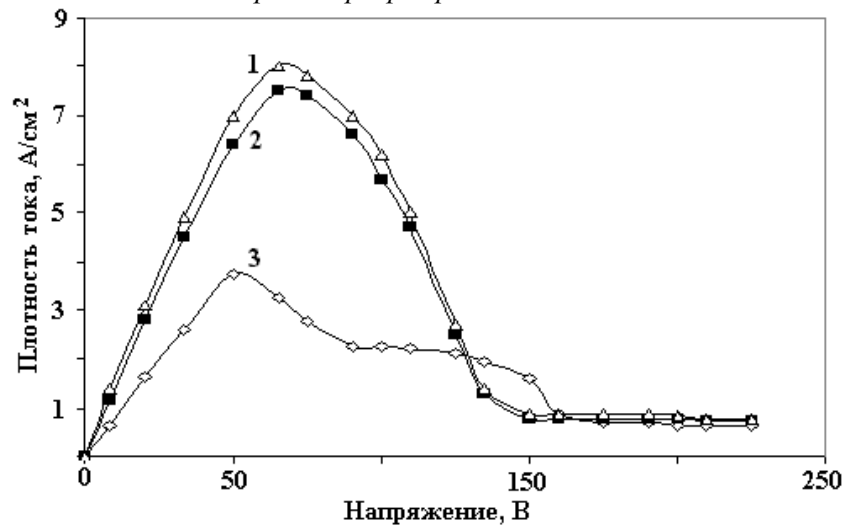


Рис. 3. ВАК анодного поведения нейзильбера в 4% растворе $(\text{NH}_4)_3\text{PO}_4$ при $\text{pH}=3(1), 5(2), 7(3)$.

При снижении pH среды наряду с увеличением тока на начальном участке ВАК происходит уменьшение и исчезновение площадки предельного тока. При этом отмечено отсутствие образования солевых налетов на поверхности образцов во всей области напряжений. При значениях pH=3 и pH=5 кривые практически совпадают между собой и резко отличаются от ВАК в том же растворе при pH=7 в условиях образования солевого налета.

Важную роль в ходе процесса играют добавки комплексообразователей. В работе исследовалось влияние Трилона Б на ЭПО меди и ее сплавов. Выявлено, что добавление Трилона Б не изменяет ВАК, однако характер протекающих процессов существенно изменяется. Во всех электролитах не наблюдалось образования солевых и оксидных пленок. Поверхность образцов сохраняла естественный цвет. Отсутствовал разогрев образцов. При использовании комплексообразователей полирование поверхности происходило практически во всех электролитах.

Нагрев электрода, возможно, связан с образованием на поверхности оксидной пленки. При наличии оксидной пленки, обладающей низкой электропроводностью, именно в ней происходит значительное падение напряжения и соответственно существенное тепловыделение. Характерно, что при использовании комплексообразователей, предотвращающих образование оксида на поверхности, нагрева образцов не наблюдалось.

Важную информацию для понимания механизма ЭПО дают измерения выхода по току процессов, протекающих на электродах (см. таблицу). Некоторые результаты этих измерений приведены в таблице. Приведены средние значения выхода по току из трех измерений, при этом погрешность определения выхода по току составляет не менее 5%.

Зависимость выхода по току анодного растворения компонентов сплавов от состава раствора и режима обработки

Образец	Раствор	Напряжение, В	T, °C	Время обработки, мин	Выход по току, %	
Медь, плоский	4% (NH ₄) ₂ SO ₄	320	70	2	25	
		360	70	2	32	
	5% NH ₄ NO ₃	320	20	2	17	
		320	70	2	30	
		370	70	2	37	
	4% NH ₄ Cl	330	70	2	496	
		370	70	2	444	
	8% NH ₄ Cl	330	70	2	304	
		2% (NH ₄) ₂ HPO ₄ , pH=7	420	70	2	72
			370	70	2	64
	320		70	2	64	
	5% (NH ₄) ₂ HPO ₄ , pH=7	420	70	2	64	
		370	70	2	63	
		320	70	2	65	
		280	70	2	55	
	10% (NH ₄) ₂ HPO ₄ , pH=7	420	70	2	78	
		370	70	2	223	
		320	70	2	192	
		280	70	2	169	
	5% (NH ₄) ₂ HPO ₄ , pH=5	420	70	2	31	
370		70	2	69		
320		70	2	90		
280		70	2	74		
5% (NH ₄) ₂ HPO ₄ , pH=3	400	70	2	53		
	370	70	2	147		
	320	70	2	140		
	280	70	2	131		
Медь, Цилиндр.	5% (NH ₄) ₂ HPO ₄ , pH=7	320	70	2	60	
	5% (NH ₄) ₂ HPO ₄ , pH=5	370	70	2	71	
	5% (NH ₄) ₂ HPO ₄ , pH=3	320	70	2	140	

Латунь, плоский	4% (NH ₄) ₂ SO ₄	320	70	1	22	
		320	70	5	23	
	8% (NH ₄) ₂ SO ₄	320	70	2	18	
	5% NH ₄ NO ₃	340	60	1	25	
	5% NH ₄ Cl	330	70	2	317	
		370	70	2	262	
	8% NH ₄ Cl	370	70	2	203	
		330	70	2	244	
	5% (NH ₄) ₂ HPO ₄ , pH=7	280	70	2	84	
		300	70	2	65	
		360	70	1	65	
		360	70	2	65	
		360	70	5	60	
	400	70	2	53		
		5% (NH ₄) ₂ HPO ₄ , pH=5	280	70	2	100
			320	70	2	103
			370	70	2	100
			420	70	2	49
	5% (NH ₄) ₂ HPO ₄ , pH=3	400	70	2	158	
		370	70	2	156	
		320	70	2	143	
		280	70	2	142	
	5% (NH ₄) ₂ HPO ₄ + 2,5% Трилон Б	240	70	2	99	
		280	70	2	103	
		340	70	2	101	
		380	70	2	104	
	10% (NH ₄) ₂ HPO ₄ ,	420	70	2	68	
		370	70	2	120	
		320	70	2	145	
	Нейзильбер, плоский	4% (NH ₄) ₂ SO ₄	320	20	1	19
320			70	1	22	
8% (NH ₄) ₂ SO ₄		320	70	2	20	
4% NH ₄ Cl		340	70	2	247	
8% NH ₄ Cl		320	40	1	244	
		320	70	1	234	
5% NH ₄ NO ₃		340	20	1	17	
		340	70	1	33	
5% (NH ₄) ₂ HPO ₄ , pH=7		420	70	2	54	
		370	70	2	60	
		320	70	2	60	
		280	70	2	49	
5% (NH ₄) ₂ HPO ₄ , pH=5		420	70	2	50	
		370	70	2	76	
		320	70	2	93	
		280	70	2	74	
5% (NH ₄) ₂ HPO ₄ , pH=3		400	70	2	140	
		370	70	2	147	
		320	70	2	125	
		280	70	2	128	
5% (NH ₄) ₂ HPO ₄ + 2,5% Трилон Б		360	70	2	102	
		320	70	2	98	
		280	70	2	100	
10% (NH ₄) ₂ HPO ₄ ,		420	70	2	63	
		370	70	2	75	
		320	70	2	102	
		280	70	2	82	

Исследовалось влияние длительности обработки, накладываемого напряжения, температуры электролита, pH раствора, комплексообразователя на процесс растворения компонентов сплава. При этом из-за близости атомных масс компонентов сплава (Zn, Ni, Cu), а также одинаковых затрат количества электричества на их растворение, даже при селективном растворении одного из компонентов определяемый выход по току имел вполне достоверные значения.

Солевые налеты (нерастворимые в воде фосфаты) удаляли обработкой образцов в растворе щавелевой кислоты. Предварительными опытами было установлено, что щавелевая кислота не действует на компоненты самого сплава. Оксидные пленки, образуемые в некоторых условиях и значительно занижающие выход по току, щавелевой кислотой не удаляются. Наблюдаемые при этом величины выхода по току выделены в таблице жирным шрифтом. Измерения выхода по току проводили лишь в области напряжений стабильной ПГО, где не наблюдалось резких изменений тока.

Основная доля тока тратится на растворение поверхностного слоя образцов. Как видно из таблицы, в растворах на основе фосфата аммония, в которых оксидные пленки не образуются, выход по току процесса растворения металлов существенно зависит от концентрации электролита и pH раствора. В 2 и 5% растворах выход по току практически одинаков и составляет в среднем 55–70%. В то же время в 10% растворе в тех же условиях обработки выход по току достигает 140% на латуни и 220% на меди, что свидетельствует о включении дополнительных механизмов растворения. Возможно, в этих условиях наряду с двухэлектронным процессом ионизации компонентов сплавов происходит ионизация с затратой одного электрона с последующим окислением образованного иона водой, либо потенциал поверхности анод-ПГО близок к коррозионному, при котором имеет место сопряженный анодному процесс восстановления, то есть реализуется процесс высокотемпературной коррозии [12]. В случае нейзильбера выход по току в этом растворе не превышал 100%, что свидетельствует о важной роли никеля в механизме анодного растворения сплава.

Еще более яркой получается зависимость от pH. При снижении pH ниже 5 единиц выход по току резко возрастает и достигает при pH=3 значений 150%, причем на всех сплавах значения выхода по току близки. Это доказывает отсутствие химического растворения образцов в данных условиях. Химическому растворению подвергались бы более электроотрицательные компоненты сплавов (Zn, Ni). Остальные факторы практически не влияют на выход по току, который не зависит от температуры раствора, длительности обработки, формы электрода.

Аномально высокие значения выхода по току наблюдались в растворе хлорида аммония. При всех исследованных режимах и концентрациях растворов выход по току превышал 200%. Превышение выхода по току более 200% указывает, скорее, на наличие особого механизма растворения, так как даже в расчете на одноэлектронный процесс ионизации всех компонентов сплавов выход по току не должен превышать 200%. Процесс растворения мало зависит от природы сплава, напряжения обработки и температуры раствора. Не исключено, что в этом случае реализуется процесс высокотемпературной коррозии.

Важно отметить, что добавка комплексообразователя стабилизирует величину выхода по току на значении ~100% во всех растворах.

Выявлены условия, при которых происходит максимальное выравнивание микрорельефа поверхности. Из всех изученных растворов полирование достигается лишь в фосфатных и сульфатных электролитах. Конечная шероховатость достигается уже через две минуты обработки, причем высота микронеровностей практически одинакова для меди и ее сплавов. В 5% растворе сульфата аммония за две минуты параметр R_a изменяется от 0,85–0,97 до 0,15–0,18 мкм, поверхность имеет блеск, несмотря на наличие оксидной пленки. В зависимости от напряжения оксидная пленка изменяет цвет от розово-фиолетового до черного. В растворах фосфата аммония оксидная пленка отсутствовала. Конечная шероховатость поверхности 0,11–0,15 мкм. При этом оптимальные результаты получались после обработки меди и ее сплавов в растворах с концентрацией около 5% в области напряжений 300–360 В. При более низких и высоких напряжениях качество полирования снижается. Оптимальной является область pH~ 4–6. В этой области pH наряду с высоким качеством обработки обеспечиваются условия для регенерации электролита, так как не происходит образования аминоккомплексов, как при более высоких значениях pH и растворимых гидрофосфатов, как при более низких значениях pH. Продукты растворения анода выделяются в виде шлама и могут быть легко выделены из раствора.

Добавки комплексообразователей значительно расширяют границы по электролитам и режимам обработки для полирования исследованных материалов. Установлено, что добавки Трилона Б способствуют достаточно быстрой потере электролитом своих эксплуатационных свойств, что связано с постепенной деструкцией комплексообразователя в условиях существования ПГО и прекращению его действия. Кроме этого, комплексообразователи значительно улучшают растворимость продуктов

анодного растворения и тем самым способствуют накоплению их в растворе. В результате этого становится невозможной регенерация электролита.

Выводы

1. Изучено поведение меди, латуни Л63 и нейзильбера в разбавленных растворах некоторых солей при анодной поляризации в широкой области напряжений. Показано, что с увеличением напряжения на аноде последовательно протекает ряд процессов: активное растворение анода, окислирование или образование солевых пленок, образование парогазовой оболочки.

2. Отмечено влияние материала анода на электродный процесс. При напряжениях до 50 В поведение определяется электроотрицательной составляющей сплава; от 50 до 120–150 В – напротив, определяющим является наличие меди – электроположительного компонента. При более высоких напряжениях медь и ее сплавы ведут себя одинаково.

3. Измерение выхода по току процесса растворения материала анода показало, что растворение является основным процессом, протекающим на аноде. Обнаружено, что в некоторых условиях выход по току процесса растворения достигает значений более 200%.

4. Установлено, что комплексообразователи существенно влияют на процессы, протекающие на аноде, предотвращая образование солевых и оксидных пленок. Отмечены положительные и отрицательные стороны использования комплексообразователей.

5. На основе полученных зависимостей предложены оптимальные условия для полирования изученных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дураджи В.Н., Фонин Г.А. Закалка стали в электролите при нагреве в электролитной плазме // Электронная обработка материалов. 1989. № 4. С. 43–46.
2. Белкин П.Н., Земский С.В., Пасинковский Е.А., Факторович А.А. Обезуглероживание стали при анодном процессе электролитного нагрева // Электронная обработка материалов. 1984. № 1. С. 42–43.
3. Дураджи В.Н., Брянцев И.В., Пасинковский Е.А. Цементация и нитроцементация стали при нагреве в электролитной плазме // Электронная обработка материалов. 1977. № 2. С. 15–18.
4. Ясногородский И.З. Нагрев металлов и сплавов в электролите. М., 1949.
5. Дураджи В.Н., Брянцев И.В., Товарков А.К. Исследование эрозии анода при воздействии на него электролитной плазмы // Электронная обработка материалов. 1979. № 5. С. 13–17.
6. Патент 1767048 СССР. МКИ⁴ С25 F3/16. Способ обработки наружных поверхностей распылителя топливной форсунки дизеля / Чачин В.Н., Паршута А.Э., Кухаренок Г.М., Пинский Д.М. и др. Оpubл. 7.10.92. Бюл. № 37
7. Патент 2127337 РФ. МКИ⁴ С25 F3/22. Способ полирования меди и сплавов на ее основе / Амирханова Н.А., Белоногов В.А., Белоногова Г.У., Вотинцева Л.В. Оpubл. 10.03.99. Бюл. № 7.
8. Патент 2116391 РФ. МКИ⁴ С25 F3/16. Способ полирования изделий / Амирханова Н.А., Белоногов В.А., Касимов Р.Г., Горяинов В.Н. Оpubл. 27.07.98. Бюл. № 21.
9. Патент 238074 ГДР. МКИ⁴ С25 F3/16. Verfahren zum Hochglänzen stromleitender Werkstücke im anodischen Electrolytplasma / Н.Нoyer, F.Rössner, K.Rabending, E.Kirsche, J.Pampel. Оpubл. 6.08.86.
10. Патент 2118412 РФ. МКИ⁴ С25 F3/24. Способ электрохимического полирования изделий из хромоникелевых сталей / Ставышченко А.С., Скифский С.В., Наук П.Е. Оpubл. 27.08.98. Бюл. № 24.
11. Савотин И.В., Давыдов А.Д. Электрохимическое полирование меди и вольфрама при высоких напряжениях в присутствии парогазовой оболочки на электроде // Электронная обработка материалов. 1998. № 5. С. 4–11.
12. Згардан И.М., Ганчар В.И., Дикусар А.И. Аномальное анодное растворение меди в условиях электролитного нагрева // Электрохимия. 1999. Т.35. № 4. С.542–544.

Поступила 06.12.2000

Summary

The behavior of copper and its alloys (brass and nickel silver) was analysed in diluting solutions of some salt with anodic polarisation in wide region of voltage (from 0 to 420 V). The region of voltage corresponding to electrode surface dissolution, to oxide film formation or to salts films formation, gaseous vapour envelope formation were investigated. The influence of anode material on electrode process is investigated. It was shown that the process of anode dissolution is the main thing in the voltages region of stable gaseous vapour envelope. Anomalous high meaning of current efficiency process dissolution in some conditions were found. Positive and negative sites of using complexing agent were marked. Optimal compositions of electrolytes and parameters for polishing of investigative materials were suggested.

И.А. Абдуллин

ОПЫТ НАНЕСЕНИЯ ХИМИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ

*Казанский государственный медицинский университет,
пр. Серова, д.4, г. Казань, 420012, Татарстан, Россия*

Метод химического восстановления является одним из современных способов нанесения как металлических, так и композиционных покрытий [1]. Разработка процессов нанесения композиционных химических покрытий (КХП), в частности с матрицей из никеля, перспективна для поверхностного упрочнения сложнопрофилированных изделий типа пресс-форм, режущего инструмента и других изделий, работающих на износ.

Полагая, что основные стадии, характерные для образования композиционных электрохимических покрытий [2], имеют место и при формировании КХП, следует иметь в виду и принципиальные различия химического и электрохимического выделения металла.

Химическое осаждение металла не связано с распределением тока, что позволяет наносить покрытия равномерной толщины на детали сложной конфигурации в условиях доступа раствора к покрываемой поверхности. При образовании КХП происходит захват частиц малых размеров из электролита-суспензии (ЭС). Согласно [1], это вызвано тем, что в ходе соосаждения “создаются неблагоприятные условия для вхождения частиц в покрытия – ускоренная седиментация таких частиц в суспензии по сравнению с частицами меньшего размера и большая вероятность удаления частицы с поверхности покрываемого образца, так как скорость осаждения металлической матрицы недостаточна для удержания крупной частицы в течение времени, необходимого для ее полного заключения в металлическую матрицу”.

Нанесение КХП в первую очередь связано с подготовкой ЭС, выбором способа и оценки степени суспендирования. На практике нужны простые и надежные методы подготовки, получения и оценки эффективности перемешивания ЭС, при которых исключались бы застойные зоны и зоны интенсивного обтекания поверхности катода электролитом с гидродинамическим уносом частиц. На основе предварительных исследований было установлено, что наиболее эффективными способами создания однородных по объему ЭС являются методы рециркуляции и виброгидравлического перемешивания [3]. На рис. 1 представлен вариант ванны с виброгидравлическим перемешиванием для нанесения КХП. Ванна (до 20 л) изготовлена из оргстекла, в качестве подвижного дна использована кислотостойкая резина толщиной 1 мм. Амплитуда и частота воздействия толкателя на подвижное дно регулируются скоростью вращения кулачкового механизма.

Для оценки степени перемешивания ЭС введено понятие критической скорости потока, при которой достигаются оптимальные для соосаждения условия суспендирования. Эта скорость может быть выражена зависимостью некоторого параметра перемешивания от условий гидродинамического воздействия [4]. Таким параметром принят коэффициент перемешивания A , определяемый как относительное среднеквадратичное отклонение от среднего значения концентрации:

$$A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta C_i)^2}{n \cdot C_0}},$$

где C_0 – заданная концентрация ЭС; C_i – среднее значение концентрации в сечении электролитической ванны; $\Delta C_i = |C_0 - C_i|$; n – число отбора проб ЭС, то есть число сечений.

Коэффициент A может изменяться от единицы при очень плохом перемешивании до нуля при полном перемешивании. За критическую (рабочую) скорость перемешивания принимается наименьшая скорость потока или частотного воздействия, когда A достигает значений 0,05–0,10 при $n=5-10$ и исходной концентрации частиц 60–100 г/л в ЭС.

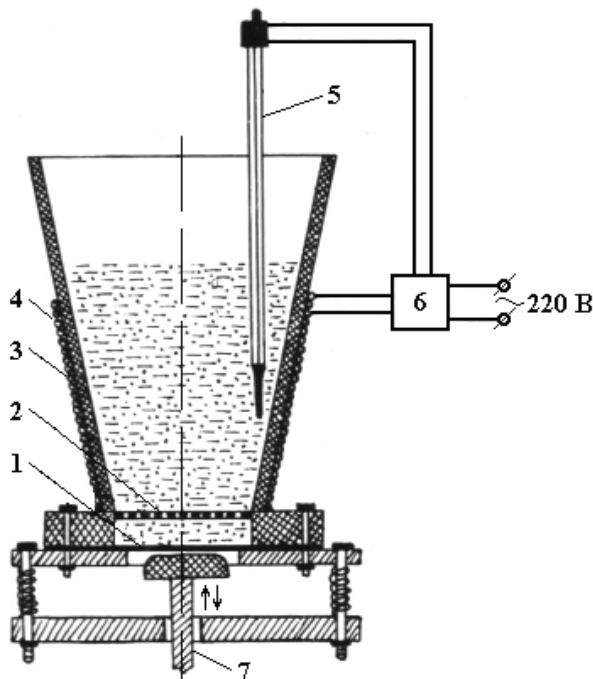


Рис. 1. Схема установки для нанесения КХП. 1 – подвижное дно ванны; 2 – перфорированное дно; 3 – ванна; 4 – обогреватель; 5 – контактный термометр; 6 – реле; 7 – толкатель.

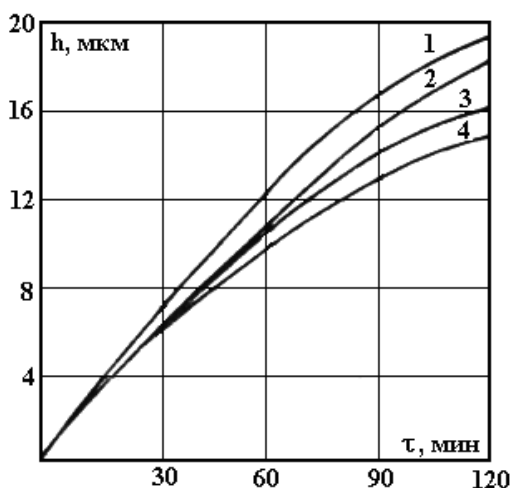
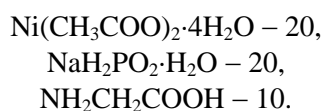


Рис. 2. Зависимость толщины никелевых покрытий от времени осаждения. 1 – без ДЧ; 2 – Al_2O_3 ; 3 – Cr_2O_3 ; 4 – TiO_2 . Дисперсность 0,5–5 мкм, концентрация 20 г/л.

Выбор электролитов для нанесения КХП в первую очередь обусловлен требованиями к их стабильности в присутствии дисперсных частиц (ДЧ), достаточной скоростью выделения металла и относительно низкой температурой протекания процесса. Поэтому в качестве исходного был принят кислый электролит химического никелирования при средней концентрации состава [5], г/л:



Процесс проводится при pH 5,3-5,5; температуре $80 \pm 5^\circ\text{C}$, плотности загрузки $1 \text{ дм}^2/\text{л}$. Данный электролит прост по составу, легко корректируется, стабилен и позволяет получать КХП даже при температуре 60°C . В качестве основы использовались образцы из Ст. 45, подготовка их и ДЧ, корректировка электролита по мере выработки изложены в [6].

Присутствие частиц второй фазы изменяет скорость осаждения. Как правило, она уменьшается (рис. 2). По-видимому, это вызвано экранированием включающимися частицами каталитически более активных центров поверхности матрицы, а также более быстрой выработкой раствора за счет выделения металла на ДЧ, закрепленных на катоде. Эти вопросы требуют детального исследования. Содержание частиц в КХП никеля зависит от природы, концентрации ДЧ и проходит через максимум. Обычно экстремальная концентрация соответствует 15–20 г/л.

Композиционные химические покрытия обладают более высокой твердостью, что определяется количеством и природой соосаждаемых ДЧ (см. таблицу).

Микротвердость и массовое содержание (a_m , %) ДЧ в КХП с матрицей из никеля. Концентрация ЭС – 20 г/л, фракция 0,5–5 мкм

Покрытие	Толщина, мкм	a_m , %	Микротвердость, ГПа
Ni–NiP	25	–	5,8
Ni–NiP–Al ₂ O ₃	28	11–12	6,9
Ni–NiP–ZrO ₂	24	6,0–7,5	6,7
Ni–NiP–Cr ₂ O ₃	25	8,5–9,0	6,5
Ni–NiP–TiO ₂	26	7,0–8,0	6,4

Проведенные исследования свойств КХП с матрицей из никеля позволили рекомендовать их для повышения износостойкости пресс-форм, технологических ножей экструдера, медицинских иглодержателей, зубных боров и других изделий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Борисенко А.И., Гусева И.В. Получение композиционных покрытий методом химического осаждения. Л., 1979.
2. Сайфуллин Р.С. Неорганические композиционные материалы. М., 1983.
3. Абдуллин И.А., Ильин В.А., Курашкин Р.С. Установка для интенсификации электрохимических процессов. Инф. листок Тат. ЦНТИ, Казань, 1977. № 35–77.
4. Новицкий Б.Г. Применение акустических колебаний в химико-технологических процессах. М., 1983.
5. А.с. СССР № 232705. Кислый электролит для химического никелирования металлов. Головчанская Р.Г., Кудрявцев Н.Т., Гаврилин Л.П., Землянухина Л.Г. Бюл. № 1. 1969.
6. Абдуллин И.А., Головчанская Р.Г., Кругликов С.С. и др. Нанесение композиционных химических покрытий из гипофосфитного электролита никелирования. Инф. листок Тат. ЦНТИ. Казань, 1989. № 161–89.

Поступила 09.10.2000

Summary

The results and conditions of application of chemical compositional coatings were adduced. The expression for estimating of mixing degrees of electrolyte-suspensies was given, and the notion of coefficient of mixing and the way of its determination was introduced. The scheme of installation for compositional coatings application on the basis of chemically precipitated nickel was shown.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОГО ЛЕГИРОВАНИЯ ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ПОЛОМОК ДЕРЕВОРЕЖУЩИХ ПИЛ

Научно-технический центр “ELIA-VIT”,
ул. Миорица, 5, г. Кишинев, МД-2028, Республика Молдова

При пилении древесины случаются частые поломки пил или зубьев, что приводит к остановкам технологических линий и в результате к снижению их производительности.

Оценка механики разрушения рамных и дисковых пил с разведенными и плющеными зубьями выполнена с использованием метода линий скольжения для плоского напряженного состояния [1–3]. Зубья пил испытывают изгиб подобно коротким кронштейнам, а рамные пилы – подобно балкам, нагруженным в центре. Опасность представляют зоны, испытывающие при изгибе растягивающие напряжения, особенно если в их пределах имеются неоднородности материала или геометрической формы (надрезы, трещины). Поэтому анализ вели с учетом проявляющихся неоднородностей.

При непрерывной работе пилы ее зубья нагреваются: наибольшая температура наблюдается в зоне режущей кромки. Температура в зоне кромки постепенно снижается к основанию зуба. У основания температура может составлять 200–300⁰С, при этом ухудшаются пластические свойства стали (материал пил – стали 9ХФ, 8Х6НФТ). На рис. 1 показан характер изменения допустимой предельной деформации ε_{np} для стали 45 при показателе схемы напряженного состояния $\sigma_i/\tau_i=0,58$ (σ_i – среднее нормальное напряжение, τ_i – интенсивность касательных напряжений) от температуры. Видно, что при температуре 100–300⁰С ε_{np} существенно уменьшается в сравнении с этой характеристикой при комнатной температуре. Предельно допустимую деформацию при $\sigma_i/\tau_i=0,58$ можно определить по формуле

$$\varepsilon_{np}=1,73\ln[100/(100-\Psi_{III})],$$

где Ψ_{III} – относительное поперечное сужение образца при испытании на разрыв, являющееся функцией температуры.

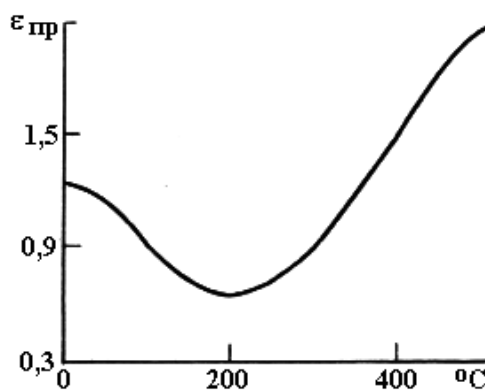


Рис. 1. Характер изменения предельно допустимой деформации ε_{np} в зависимости от температуры нагрева деформируемой стали 45.

Следует добавить, что из-за наводораживания происходит охрупчивание инструмента. Содержание водорода в стали 9ХФ при пилении древесины хвойных пород увеличивалось в 2,5 раза [3]. При наличии концентратора напряжений, сформированного при обрезке или заточке зубьев (рис. 2), у основания вероятно появление трещины разрушения при условии, что накопленная остаточная деформация при цикловом нагружении достигнет предельно допустимой степени деформации, более низкой в области реализующихся температур. Развиваясь в глубь зуба, трещина

приводит к его выкрашиванию. Поэтому в первую очередь исключали концентраторы напряжений: трещины, царапины от обрезающего ножа, от отдельных крупных зерен абразивного круга при заточке. Затем с учетом температурного поля в резце для обеспечения водородостойкости при пилении хвойных пород древесины пилы из стали 9ХФ легировали электродами из твердого сплава ВК8 (ГОСТ 3882-74), а также последовательно твердым сплавом и хромом или медью с использованием установки Элитрон-22. На рис. 2 показана схема нанесения покрытия на боковую поверхность зуба.

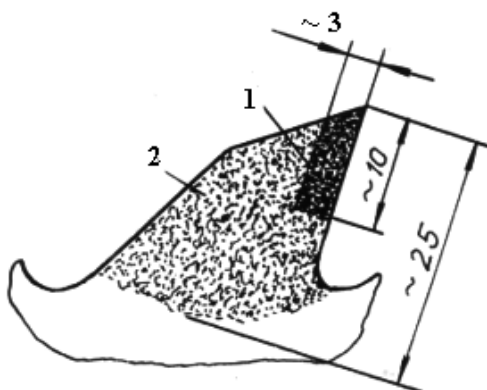


Рис. 2. Схема нанесения упрочняющего покрытия на поверхность зуба пилы.

Поскольку опасные зоны хрупкого разрушения зубьев располагаются за пределами контактной зоны режущего элемента со стружкой, то зону упрочнения увеличивали так, чтобы она перекрывала участки зуба, где температура нагрева может достигать до $200\text{--}300^{\circ}\text{C}$. С целью повышения сопротивления цикловой усталости границу зоны формировали в форме зигзага. При легировании обеспечивали равномерный рельеф без пропусков по пояску 1 шириной около 3 мм и длиной 10–15 мм, в зоне 2 допускались незначительные пропуски. При рабочем токе 1–1,5 А толщина покрытия составляла 15–30 мкм. Второй слой формировали толщиной 5–15 мкм. Причем при плющенных зубьях покрытия следует наносить на обе боковые поверхности, при разведенных зубьях – на одну, обращенную к поверхности пропила. При длине короткой кромки режущего клина около 4 мм покрытия надо наносить и на задние поверхности зубьев, а заточку производить по передним поверхностям.

Производственные испытания в условиях многих леспромхозов и деревообрабатывающих предприятий показали устойчивое 2-4-кратное и более увеличение ресурса пил, резкое снижение случаев выкрашивания зубьев.

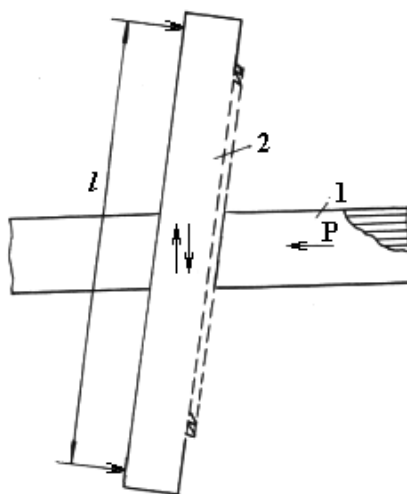


Рис. 3. Схема работы пилы 2 при пилении бревна 1.

На рис. 3 показана схема работы рамной пилы, на полотно которой действуют изгибающие силы, как нормальные к его боковой поверхности, так и в плоскости полотна [4]. Поэтому на

наружных кромках полотна при явно выраженной неоднородности металла и наличии концентратора напряжений вероятно зарождение трещины разрушения. Неоднородность свойств металла (снижение ε_{np}) может быть вызвана вследствие трения нагревом до 200–300 °С (синеломкость стали) края полотна пилы, противоположащего зубьям. Такие случаи наблюдались из-за изгиба и упрочнения края, наличия заусенца при обрезке полотна, а также перекоса пилы при креплении в пильной рамке.

Макрофрактографические исследования поверхностей изломов рамных пил показали, что трещина появлялась на кромке полотна, имевшей концентратор и интенсивно нагревавшейся при трении и испытывавшей растягивающие напряжения при работе пилы. Примерно на половине ширины полотна разрушение вызывалось его растяжением и продольным изгибом (поверхность излома образует угол около 45° к плоскости полотна), а затем – сил, вызванных преимущественно изгибом на ребро под давлением P распиливаемого бревна (шевронный узор на поверхности излома).

Для предотвращения поломок пил по этой причине устраняли концентраторы напряжений на кромке (риски, забоины), заострение вследствие изгиба края, разупрочняли наружную часть полотна на глубине около 0,5 его толщины (можно снять упрочненный слой). На боковые поверхности полотна в средней части пилы наносили электроэрозионное покрытие медью на длине 0,3 l при ширине полоски около 10 мм. Это обеспечивало быстрый отвод тепла от зоны трения и интенсивного тепловыделения.

Производственные испытания в условиях Сосногорского леспромхоза (Автономная Республика Коми, Россия) показали высокую эффективность этих мер предотвращения поломок пил.

ЛИТЕРАТУРА

1. Качанов Л.М. Основы теории пластичности. М., 1969.
2. Нотт Дж. Ф. Основы механики разрушения. М., 1978.
3. Тимощенко В.А. Повышение износостойкости дереворежущих инструментов. Кишинев, 1992.
4. Ивановский Е.Г. Резание древесины. М., 1975.

Поступила 08.09.2000

Summary

Is established, that the widespread causes of breakings of saws and them toothes are availability of stress raisers and heating of a cloth in this zone up to temperatures of blue brittleness of stell. The route of elimination of the causes of breakings including deposition of coatings by electroerosive doping on definite zones of a surface of a saw are offered.

А.И. Григорьев, А.Р. Гаибов, Д.Ф. Белоножко

АКУСТИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ОТ ОСЦИЛЛИРУЮЩЕЙ ЗАРЯЖЕННОЙ КАПЛИ

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

Изучение взаимодействия звуковых и ультразвуковых волн с жидкокапельными системами естественного и искусственного происхождения представляет интерес в связи с многочисленными академическими, техническими и технологическими проблемами. Речь идет об акустическом рассеянии туманов и облаков, о разработке устройств для электростатически-акустической и электромагнитно-акустической левитации капель в поле сил тяжести для прецизионных измерений физико-химических свойств веществ, об акустической коагуляции аэродисперсных систем, об экспериментах по разбрызгиванию жидкостей в реактивных двигателях для снижения высокочастотных шумов (см., например, [1–8] и указанную там литературу). Но несмотря на очевидную важность проблемы существующие теоретические представления, как правило, пренебрегают наличием у капель внутренних степеней свободы, связанных с их капиллярными колебаниями, хотя хорошо известно, что частоты капиллярных колебаний капель с размерами, характерными для жидкокапельных систем естественного происхождения (туманов, облаков, дождя), приходится на диапазоны частот звуковых волн и длинноволновых ультразвуковых. Наличие на каплях электрического заряда, отклонение формы капель от сферической, движение капель относительно внешней среды, учет их вязкости, приводят к смещению спектра капиллярных колебаний в область более низких значений [9–12], то есть в область звуковых волн, воспринимаемых человеческим слухом.

В связи со сказанным будем решать задачу о звуковом излучении колеблющейся капли радиуса R идеальной несжимаемой электропроводной жидкости плотностью ρ_1 , с коэффициентом поверхностного натяжения \mathcal{Y} , имеющей заряд Q . Внешнюю среду будем принимать идеальной сжимаемой, характеризуемой скоростью звука V , диэлектрической проницаемостью ε и плотностью ρ_2 . Все рассмотрение проведем в сферической системе координат с началом в центре капли.

Уравнение поверхности капли, возмущенной капиллярным волновым движением, порождаемым тепловым движением молекул, запишем в виде:

$$r(\theta, t) = R + \xi(\theta, t),$$

где $\xi(\theta, t)$ – малое возмущение равновесной сферической поверхности капли: $|\xi| \ll R$. Волновые движения в капле и окружающей среде будем считать потенциальными с потенциалами скоростей $\psi_1(\vec{r}, t)$ и $\psi_2(\vec{r}, t)$ соответственно.

Математическая формулировка задачи о расчете спектра капиллярных колебаний в описанной системе и интенсивности генерируемого ими звукового излучения в линейном по ξ/R приближении будет иметь вид [13]:

$$r \leq R: \Delta\psi_1 = 0; \tag{1}$$

$$r \geq R: \frac{1}{V^2} \frac{\partial^2 \psi_2}{\partial t^2} - \Delta\psi_2 = 0; \tag{2}$$

$$r = R: \frac{\partial \psi_1}{\partial r} = \frac{\partial \psi_2}{\partial r}; \quad (3)$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = \frac{\partial \psi_1}{\partial r}; \quad (4)$$

$$\Delta p - \rho_1 \frac{\partial \psi_1}{\partial t} + \rho_2 \frac{\partial \psi_2}{\partial t} + F_q(\theta, t) = \gamma \left[\frac{2}{R} - \frac{1}{R^2} (2 + \hat{L}) \xi \right]; \quad (5)$$

$$r = 0: |\psi_1| < \infty; \quad (6)$$

$$r \rightarrow \infty: \frac{\partial \psi_2}{\partial R} + ik\psi_2 = o\left(\frac{1}{r}\right). \quad (7)$$

Δp – перепад давлений на границе раздела сред; $F_q(\theta, t)$ – давление электрического поля на границе раздела; \hat{L} – угловая часть оператора Лапласа в сферических координатах.

Решение задачи (1) – (7) естественно искать в виде [13]:

$$\xi(\theta, t) = \sum_{n=2}^{\infty} C_n P_n(\mu) \cdot \exp(i\omega_n t); \quad \mu = \cos(\theta);$$

$$\psi_1(\vec{r}, t) = \sum_{n=2}^{\infty} A_n r^n P_n(\mu) \cdot \exp(i\omega_n t);$$

$$\psi_2(\vec{r}, t) = \sum_{n=2}^{\infty} B_n h_n^{(2)}(k_n r) \cdot P_n(\mu) \cdot \exp(i\omega t); \quad k_n^2 \equiv \frac{\omega_n^2}{V^2}; \quad (8)$$

где $P_n(\mu)$ – полиномы Лежандра; $h_n^{(2)}(k_n r)$ – вторая сферическая функция Ханкеля.

Учтем, что согласно [14] производная по времени от давления электрического поля собственного заряда на поверхность капли может быть записана в виде:

$$\frac{\partial F_q}{\partial t} = \frac{Q^2}{4\pi\epsilon R^6} \cdot \sum_{n=2}^{\infty} A_n n(n-1) \cdot R^n \cdot P_n(\mu) \cdot \exp(i\omega_n t). \quad (9)$$

Продифференцируем (5) один раз по времени и в получившееся соотношение подставим (8), (9) с учетом граничных условий (2)–(4). В итоге получим дисперсионное уравнение для капиллярных колебаний в анализируемой системе:

$$\omega_n^2 = (n-1) \frac{\gamma}{R^3} \cdot \left[\frac{Q^2}{4\pi\epsilon\gamma R^3} - (n+2) \right] \left[\frac{\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right) \cdot h_n^{(2)}(k_n r)}{k_n R h_{n-1}^{(2)}(k_n r) - (n+1) h_n^{(2)}(k_n r)} - \frac{1}{n} \right]^{-1} \quad (10)$$

Если положить, что $V \rightarrow \infty$, то есть принять внешнюю среду несжимаемой, то выражение (10) переходит в известное [14] дисперсионное уравнение для капиллярных колебаний идеальной несжимаемой электропроводной капли в идеальной несжимаемой диэлектрической среде, имеющее вид:

$$\omega_n^2 = \frac{(n+1)n(n-1)}{\rho_2 n + (n+1)\rho_1} \frac{\gamma}{R^3} \cdot [(n+2) - W]; \quad W = \frac{Q^2}{4\pi\epsilon\gamma R^3}. \quad (11)$$

Для основной моды ($n = 2$) капиллярных колебаний капли уравнение (10) будет иметь вид:

$$\omega^2 = \frac{\gamma}{R^3} (W - 4) \cdot \left[\frac{(\rho_2/\rho_1) [3R\omega/V + i(-3 + R^2\omega^2/V^2)]}{(-9R\omega/V + R^3\omega^3/V^3) + i(9 - 4R^2\omega^2/V^2)} - \frac{1}{2} \right]^{-1}. \quad (12)$$

Численный анализ этого уравнения показывает, что оно имеет пять корней. Если принять $\rho_1 = 1 \text{ г/см}^3$, $\rho_2 = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3$, $V = 3,3 \cdot 10^4 \text{ см/с}$, $R = 0,01 \text{ см}$, $\gamma = 72 \text{ дин/см}$, $W = 1$ (что соответствует капиллярным колебаниям в воздухе при атмосферном давлении капли воды, несущей заряд равный одной четвертой от предельного в смысле устойчивости по Рэлею), то получим следующие значения корней:

$$\begin{aligned} \omega_2^{(1)} &= (2,1 \cdot 10^4 + i \cdot 2,5 \cdot 10^{-12}) \text{ с}^{-1}; \quad \omega_2^{(2)} = (-2,1 \cdot 10^4 + i \cdot 2,5 \cdot 10^{-12}) \text{ с}^{-1}; \\ \omega_2^{(3)} &= (6,5 \cdot 10^6 + i \cdot 3,7 \cdot 10^6) \text{ с}^{-1}; \quad \omega_2^{(4)} = (-6,5 \cdot 10^6 + i \cdot 3,7 \cdot 10^6) \text{ с}^{-1}; \quad \omega_2^{(5)} = i \cdot 6 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}. \end{aligned}$$

Первые два корня соответствуют капиллярным осцилляциям капли с частотами примерно равными определенным из соотношения (11) при $n = 2$. Эти осцилляции весьма медленно затухают за счет отбора энергии на создание продольных волн ультразвукового диапазона во внешней среде, которые реализуются на частотах $\omega_2^{(1)}$ и $\omega_2^{(2)}$ приблизительно равных корням дисперсионного уравнения (11). Вторая пара корней соответствует быстро затухающим колебаниям сжимаемой среды в малой окрестности поверхности капли на частотах порядка частот собственных колебаний среды в объеме, равном объему капли (вихревым движениям среды у поверхности капли). Пятый корень соответствует быстрому аperiodическому рассасыванию возмущений плотности внешней среды у поверхности капли. Из сказанного следует, что в плане исследования звуковых колебаний, генерируемых осцилляциями несжимаемой капли, основной интерес представляют первые два корня уравнения (12).

Чтобы получить аналитическое выражение для величины декремента затухания η , соответствующего первым двум корням (12), будем искать решение (12) в виде $\omega = \omega_0 + i \cdot \eta$, где согласно вышеприведенным результатам численных расчетов $\eta \ll \omega_0$. Подставим в (12) $\omega = \omega_0 + i \cdot \eta$ и, раскладывая различные степени ω в линейном по η приближении, приравняем нулю мнимую часть получившегося соотношения, линейного по η . В итоге, для декремента затухания η получим выражение

$$\eta \approx \frac{\rho_2 R^5 \omega_0^6}{81 \cdot \rho_1 \cdot V^5}.$$

Полная интенсивность звукового излучения колеблющейся капли определяется известным выражением [13]:

$$I = \rho_2 V \cdot \oint \overline{v^2} ds, \quad (13)$$

где черта над выражением означает среднее по периоду колебания значение, то есть $\overline{v^2}$ есть среднее значение квадрата скорости частиц среды в звуковой волне, а интегрирование производится по замкнутой поверхности, охватывающей начало координат. Выберем в качестве такой поверхности сферу радиуса R_0 , где $R_0 \gg \lambda$, λ – длина волны.

Учитывая, что $\vec{v} = \text{Re}[grad(\psi_2)]$, а также принимая во внимание ортогональность полиномов Лежандра, для полной интенсивности звукового излучения капли, осциллирующей без изменения объема, получим

$$I(V, R, \gamma, \rho_2, \rho_1) = \sum_{n=2}^{\infty} \frac{\pi \rho_2 V R^2 C_n^2 \omega_n^2}{[kR h_{n-1}^{(2)}(kR) - (n+1) h_n^{(2)}(kR)] \cdot [kR h_{m-1}^{(2)}(kR) - (m+1) h_m^{(2)}(kR)]}. \quad (14)$$

Оценим интенсивность акустического излучения от слабо заряженной ($W = 0,01$) дождевой капли минимально возможного размера с $R = 0,025 \text{ см}$ (согласно [15] размеры дождевых капель изменяются от 0,025 до 0,25 см, капли более мелких размеров относятся к "мороси", а более крупные

при падении в воздухе разрушаются из-за аэродинамического сопротивления, см. также [12]). Примем, что капля совершает осцилляции за счет возбуждения основной моды своих колебаний ($n = 2$) с амплитудой $C_2 = 0,1R$. Причиной колебаний капли могут служить процессы ее столкновения с более мелкими и медленно летящими, гидродинамическое притяжение к равным себе по размеру и взаимодействие с мелкомасштабной турбулентностью, характерной как для облаков, так и для дождя [15]. В силу интегрального действия указанных причин амплитуда колебаний капель может быть весьма значительной ($C_n \sim R$) [16–18]. При $\gamma = 73$ дин/см, $\omega_2 \approx 6,1 \cdot 10^3$ с⁻¹, $\rho_1 = 1$ г/см³, $k_2 \approx 0,2$ см⁻¹, $k_2 R \approx 4,6 \cdot 10^{-3}$. Примем, кроме того, что $\rho_2 = 1,3 \cdot 10^{-3}$ г/см³, $V = 3,3 \cdot 10^4$ см/с. В итоге из (14) несложно найти:

$$I \approx \frac{4\pi\rho_2 V C_2^2 R^2 \omega^2}{\left|k_2 R h_2^{(1)}(k_2 R) - 3h_2^{(2)}(k_2 R)\right|^2} \approx 2,2 \cdot 10^{-15} \text{ эрг/с.} \quad (15)$$

Отметим, что для капли с принятыми размером ($R = 0,025$ см) и зарядом ($W = 0,01$) в звуковом диапазоне будут излучать первые четыре моды, но интенсивность их излучения убывает с ростом номера моды (более чем на порядок при переходе к следующей моде).

Принимая, что в 1 км³ пространства, занятого дождем, находится $3 \cdot 10^{14}$ капель указанного размера (примерно 3 см³ на одну каплю), несложно найти, что интегральная интенсивность звукового излучения, связанного с основной модой капиллярных колебаний капли ($n = 2$), из объема в 1 км³ будет примерно равна 0,66 эрг/с на частоте $\omega_2 \approx 6,1 \cdot 10^3$ с⁻¹. Это соответствует силе звука ≈ 22 дБ на границе излучающего объема, что примерно соответствует силе звука тихой человеческой речи.

При увеличении заряда капли частота ее капиллярных колебаний будет уменьшаться в соответствии с (11). При этом будут уменьшаться k_2 и $k_2 R$, а следовательно, и интенсивность излучения. Так, при $W = 1$ интенсивность I при $\omega_2 \approx 5,3 \cdot 10^3$ с⁻¹ будет равна $\approx 7,6 \cdot 10^{-16}$ эрг/с, а сила звука на границе излучающего объема в 1 км³ теперь составит примерно 17 дБ.

Если в (15) подставить выражение для k_2 через ω_2 и ω_2 через R , то несложно получить, что интенсивность звукового излучения от колеблющейся капли $I \sim R^{-2}$. Это означает, что звуковое излучение от крупных капель при прочих равных условиях будет существенно более слабым. Так для наиболее крупной дождевой капли с $R = 0,25$ см и $W = 0,01$ интенсивность звукового излучения, связанного с основной модой, происходящего на частоте 190 с⁻¹, составляет всего $\approx 1,8 \cdot 10^{-17}$ эрг/с. Расчет же силы звука при тех же условиях, что в вышеприведенном примере (от облака в 1 км³), дает весьма малую величину ≈ 1 дБ. Звук такой силы человеческий слух не воспринимает. При увеличении заряда капли, например для капли с $R = 0,25$ см и $W = 0,1$, интенсивность звукового излучения, идущего на частоте ≈ 126 с⁻¹, связанного с основной модой, равна $\approx 5,2 \cdot 10^{-18}$ эрг/с.

Звук, порождаемый капиллярными колебаниями больших капель, будет достаточно интенсивен для восприятия на слух только при большой амплитуде колебаний капли, когда она будет сравнима с радиусом капли R (как это наблюдается в экспериментах и натуральных исследованиях дождя [16–18]). В этом случае сила звука будет такой же, как и для капель в вышеприведенном примере $R = 0,025$ см.

Следует отметить, что частотам звуковых колебаний, воспринимаемых слухом человека, соответствуют более сорока первых частот капиллярных колебаний капли с $R = 0,25$ см. Поэтому, несмотря на то, что их интенсивность, как отмечалось выше, будет мала, суммирование интенсивностей звукового излучения капли на различных частотах (поскольку ухо воспринимает звук интегрально во всем диапазоне звуковых волн) может превысить нижний порог слышимости.

Очевидно, что в условиях реальных осадков, характеризующихся широкой функцией распределения капель по размерам $f = f(R)$, полная интенсивность акустического излучения определится суммированием звукового излучения всех капель, излучающих в представляющем интерес диапазоне частот:

$$I(V, R, \gamma, \rho_2, \rho_1) = \int I(R) \cdot f(R) \cdot dR.$$

Все вышесказанное применимо также к облакам и туманам. Следует лишь учесть, что облака и туманы характерны меньшими средними значениями радиусов капель по сравнению с дождем, и будут излучать звук в слышимом диапазоне длин волн только при больших зарядах отдельных капель, близких к предельному в смысле устойчивости по отношению к собственному заряду (когда $W \rightarrow 4$) [9, 14].

Таким образом, интегральное акустическое излучение, связанное с капиллярными колебаниями капель в жидко-капельных системах естественного и искусственного происхождения может быть весьма значительным. Этот феномен может быть использован для дистанционного обнаружения и зондирования облаков и туманов в естественных условиях. Возможно использование искусственных жидко-капельных систем для экранирования звуковых помех.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ 00-15-9925.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стретт Дж.В. (Лорд Рэлей). Теория звука. Т.2. М., 1955.
2. Фукс Н.А. Механика аэрозолей. М., 1955.
3. Грин Х., Лейн В. Аэрозоли - пыли, дымы и туманы. Л., 1969.
4. Won-Kyu Rhim, Sang Kun Chung, Hyson M.T. et al Large charged drop levitation against gravity //IEEE Transaction on Industry Applications. 1987. V.IA-23. №6. P. 975–979.
5. Шаганов В.Ш. К теории распространения звука в тумане // Изв. АН СССР. ФАО. 1988. Т. 24. № 5. С. 506–512.
6. Качурин Л.Г. Физические основы воздействия на атмосферные процессы. Л., 1990.
7. Trinh E.H., Holt R.G, Thiessen D.B. The dynamics of ultrasonically levitated drops in an electric fields//Phys. Fluids. 1996. V. 8, № 1. P. 43–61.
8. Песочин В.Р. Возбуждение акустических колебаний при испарении капель жидкостей // ТВТ. 1996. Т. 34, № 3. С. 491–493.
9. Григорьев А.И. О механизме неустойчивости заряженной проводящей капли // ЖТФ. 1985. Т. 55. Вып. 7. С. 1272–1278.
10. Ширяева С.О., Муничев М.И., Григорьев А.И. Волновые и вихревые движения жидкости в сильно заряженной капле // ЖТФ. 1996. Т. 66. Вып. 7. С. 1–8
11. Григорьев А.И., Ширяева С.О., Коромыслов В.А. Учет эффекта релаксации электрического заряда в задаче о неустойчивости заряженной поверхности жидкости // ЭОМ. 1996. № 2–3. С. 37–40.
12. Григорьев А.И., Коромыслов В.А., Ширяева С.О. Григорьев О.А. Неустойчивость заряженной сферической поверхности в обтекающем потоке идеальной жидкости // Там же. 1998. № 1–2. С. 48–50.
13. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Механика сплошных сред. М., 1953.
14. Ширяева С.О., Григорьев А.И., Григорьева И.Д. Об устойчивости шаровой молнии по отношению к собственному некомпенсированному заряду //ЖТФ. 1995. Т. 65. Вып. 2. С. 1–10.
15. Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. Л., 1983.
16. Стерлядкин В.В. Натурные измерения колебаний капель осадков // Изв. АН СССР. ФАО. 1988. Т. 24. № 6. С. 613–621.
17. Beard K.V. Cloud and precipitation Physics Research 1983-1986 //Reviews of Geophysics. 1987. V. 25. № 1. P. 357–370.
18. Beard K.V., Tokay Ali. A field study of small raindrop oscillation //Geophysical Research Letters. 1991. V. 18, № 12. P. 2257–2260.

Поступила 19.12.2000

Summary

The dispersion equation has been obtained for the spectrum of capillary oscillations of charged drop in compressible environment. It is shown that oscillation of the drop having size and charge typical for cloud, mist or rain drop results to generations of sonic and ultrasonic waves. The expression for intensity of sonic radiation from the single drop is proposed.

ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ИМПУЛЬСНОМ РАЗРЯДЕ МЕЖДУ МЕТАЛЛИЧЕСКИМ И ЭЛЕКТРОЛИТНЫМ ЭЛЕКТРОДАМИ

*Технический университет Молдовы,
бул. Штефан чел Маре, 168, г. Кишинев, МД-2028, Республика Молдова*

В последние годы возрос интерес к источникам плазмы, в которых одним из электродов является электролитный электрод. Это связано с перспективностью практических применений этих разрядов в технологии нанесения высококачественных теплозащитных, диэлектрических, антифрикционных и противокоррозионных покрытий.

Исследование зависимости пробивного напряжения от межэлектродного расстояния и других параметров электролитической ячейки проводилось с учетом электрогидродинамических эффектов, возникающих под действием электрического поля на поверхность электролита. Типичные кадры скоростной киносъемки разрядного промежутка при положительной полярности (при отрицательной полярности они аналогичны) электролитного электрода представлены на рис. 1,а–в. В качестве электролитного электрода использовался водный раствор хлористого натрия электропроводностью $0,2 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$, а металлическим электродом служил вольфрамовый стержень с полированной полусферической поверхностью диаметром 2,7 мм.

В предпробивной стадии электрического разряда под действием электрического поля под металлическим электродом происходит подъем электролита, поверхность которого принимает конусообразную форму, и электрический пробой разрядного промежутка осуществляется между электролитным “острием” и металлическим электродом (рис. 1,а).

В определенных пределах электрического напряжения, зависящего от формы и диаметра металлического электрода, величины межэлектродного зазора, подъем жидкости прекращается, поверхность электролита не деформируется и электрический разряд протекает между металлическим электродом и плоской поверхностью электролита (рис. 1,б).

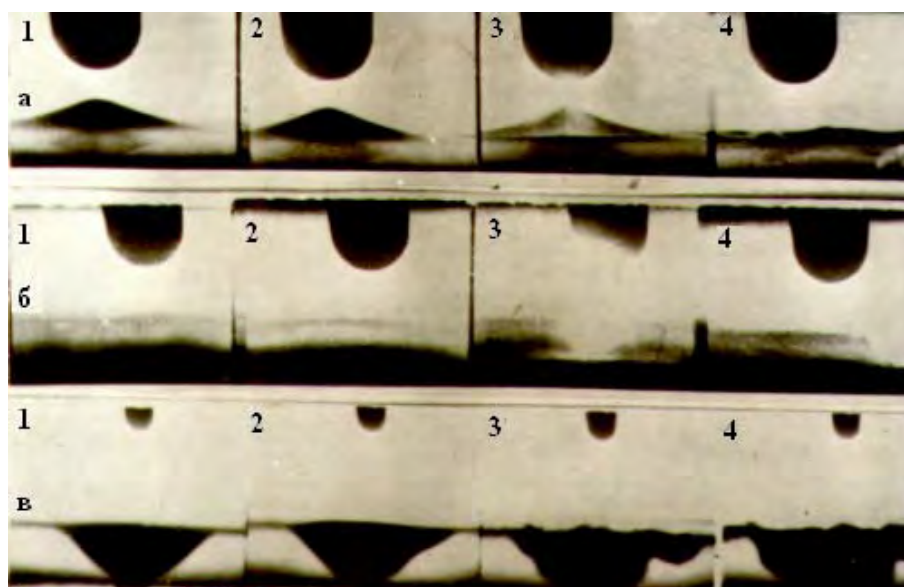


Рис. 1. Пробой межэлектродного промежутка при напряжении: а – 4,8; б – 7,9; в – 19 кВ. Скорость съемки 4000 кадр/с.

Так как пробивные характеристики электрических разрядов изучались при атмосферном давлении, а металлический электрод имел малый радиус кривизны, то дальнейшее увеличение межэлектродного расстояния, а вместе с ним и пробивного напряжения вызывает развитие коронного разряда с металла. Вокруг металлического электрода при обеих его полярностях образуется коронирующий слой, в котором происходит ионизация и свечение газа. Дальнейшее увеличение разности потенциалов между электродами приводит к расширению коронирующего слоя, вплоть до поверхности электролита. Электрический ветер с металлического электрода, возникающий в результате передачи частицам газа импульса ионами, которые двигаясь через внешнюю область коронного разряда от коронирующего электрода к некоронирующему, приводит к турбулентному движению газа в разрядном промежутке.

Показано [1–3], что в случае коронного разряда между острием и плоскостью для системы, состоящей из двух металлических электродов, существует механическая сила, величина которой зависит от полярности острия. Поэтому возникающий коронный разряд с металлического электрода приводит к деформации поверхности электролита в виде впадины (рис 1,в) и пробой разрядного промежутка осуществляется между металлическим электродом и точкой на поверхности впадины, соответствующей максимальной напряженности электрического поля.

Исследованные зависимости высоты поднятия поверхности раствора от пробивного напряжения показали, что величина подъема жидкости обусловлена полярностью и электропроводностью водного раствора, причем при положительной полярности электролитного электрода она меньше, чем при отрицательной. Уменьшение электропроводности раствора приводит к снижению высоты подъема. Можно предположить, что указанные зависимости высоты поднятия жидкости обуславливаются избыточными электрическими зарядами на его поверхности при отсутствии внешнего электрического поля. Наличие поверхностного потенциала [4, 5] связано с ориентацией диполей молекул воды и предпочтительной адсорбцией определенных ионов на поверхности раздела электролит-воздух. В работах [4, 5] указывается, что на поверхности электролитов образуется избыточный заряд, в большинстве случаев отрицательный, из-за структуры двойного электрического слоя на поверхности раздела электролит-воздух. По этой причине исследовалась зависимость высоты подъема поверхности электролита от межэлектродного расстояния для водных растворов, обладающих отрицательными, положительными и нулевыми изменениями поверхностного потенциала относительно дистиллированной воды. В качестве таких электролитов использовались растворы сернокислого натрия плотностью $1,14 \text{ г/см}^3$ и поверхностным потенциалом 40 мВ, раствор хлористого аммония плотностью $1,015 \text{ г/см}^2$, у которого изменения поверхностного потенциала для данной плотности не обнаружено. В качестве электролита с отрицательным потенциалом использовался водный раствор хлористого натрия плотностью $1,194 \text{ г/см}^3$ и поверхностным потенциалом – 25 мВ.

Исследования характера зависимости величины подъема поверхности электролита от его полярности в момент пробоя разрядного промежутка показали, что в растворах хлористого натрия максимальная величина подъема жидкости при отрицательной полярности свободной поверхности электролита больше, чем при положительной (рис. 2). Для раствора сернокислого натрия влияние полярности электролитного электрода носит обратный характер (рис. 3). При использовании водного раствора хлористого аммония в качестве электролитного электрода зависимость величины подъема жидкости от его полярности нами не обнаружена.

Отмеченные закономерности деформации поверхности электролита под действием внешнего электрического поля от полярности электролитного электрода находятся в соответствии с приведенными данными об изменении величины поверхностного потенциала водных растворов относительно дистиллированной воды. При этом следует принимать во внимание то, что указанное изменение поверхностного потенциала в зависимости от рода и концентрации электролита исследовалось при отсутствии внешнего электрического поля. В нашем же случае в межэлектродном промежутке накладывается внешнее электрическое поле напряженностью не менее 10^6 В/м , которое, очевидно, вызывает перераспределение электрических зарядов на поверхности электролита, чем и вызывается подъем поверхности при любой его полярности.

Кроме строения двойного электрического слоя на поверхности раздела электролит-воздух на подъем электролита под действием электрического поля влияют плотность и вязкость жидкости, а также сила поверхностного натяжения, которая, в свою очередь, зависит от поверхностной концентрации зарядов.

Таким образом, в разрядном промежутке, состоящем из металлического и электролитного

электродов, невозможно получить однородное электрическое поле. Поэтому оценим напряженности электрического поля, при которых осуществляется электрический пробой, в случае, когда под действием кулоновских сил на свободную поверхность электролита происходит ее возмущение и разряд протекает между металлической полусферой и электролитным “острием”. Возмущенную поверхность электролита в момент пробоя можно представить в виде конуса. Напряженность электрического поля у электролитного “острия” можно определить из равенства

$$\alpha\Delta S + \rho ghV = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2} \cdot V, \quad (1)$$

где α – коэффициент поверхностного натяжения раствора, Н/м; ΔS – изменение площади поверхности в результате подъема электролита, м²; ρ – плотность водного раствора, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; h – расстояние от центра тяжести конуса до первоначального уровня электролитной поверхности, м; V – объем возмущенной части электролита, м³; ε – диэлектрическая проницаемость воздуха; ε_0 – электрическая постоянная, равная $8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; E – напряженность электрического поля вблизи электролитного “острия”, кВ/м.

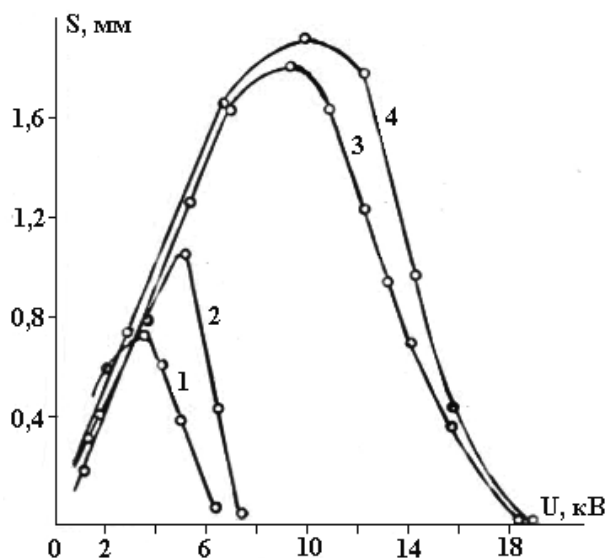


Рис. 2. Зависимость высоты поднятия поверхности хлористого натрия от пробивного напряжения при положительной (1 и 3) и отрицательной (2 и 4) полярности электролита. Диаметр металлического электрода 2,7 мм (кривые 1 и 2), 9,8 мм (кривые 3 и 4).

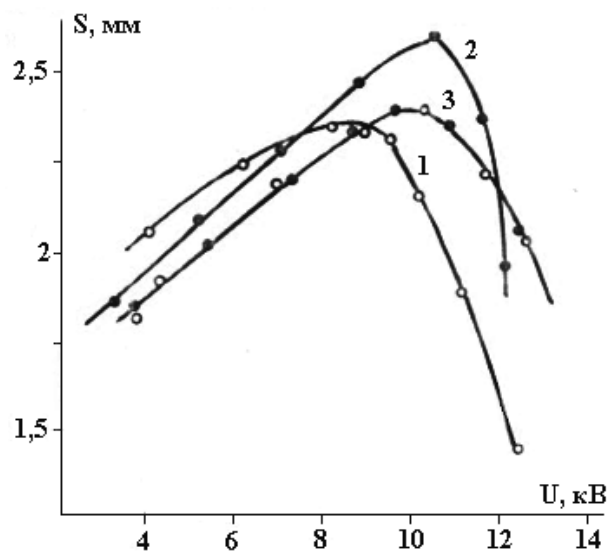


Рис. 3. Зависимость высоты поднятия поверхности раствора сернокислого натрия – катода (1) и анода (2), а также хлористого аммония (3) от пробивного напряжения. Диаметр металлического электрода 9,8 мм.

Изменение площади поверхности электролита в результате его подъема

$$\Delta S = \pi \cdot h^2 \cdot \operatorname{tg} \varphi \left(\frac{1 - \sin \varphi}{\cos \varphi} \right), \quad (2)$$

где φ – угол между высотой и образующей конуса, град. С учетом того, что

$$V = \frac{1}{3} \pi S^3 \operatorname{tg}^2 \varphi, \quad h = \frac{1}{4} S, \quad (3)$$

где S – максимальная высота подъема поверхности электролита, м; напряженность электрического поля у электролитного “острия” в момент пробоя межэлектродного промежутка

$$E = \left[\frac{2}{\varepsilon \varepsilon_0} \left(\frac{3\alpha(1 - \sin \varphi)}{\cos \varphi} + \frac{\rho g S}{4} \right) \right]^{1/2}. \quad (4)$$

Измерив высоту подъема поверхности электролитного электрода в момент электрического пробоя и угол между высотой и образующей конуса, оценим напряженность электрического поля для некоторых пробивных напряжений при обеих полярностях электролитного электрода (см. таблицу). По полученному выражению для напряженности электрического поля вблизи электролитного “острия” можем оценить некоторую эффективную напряженность электрического поля вблизи поверхности электролитного электрода, при которой осуществляется электрический пробой разрядного промежутка. При этом влияние полярности электролитного электрода на величину напряженности электрического поля не учитывается, ибо отсутствуют сведения о характере изменения коэффициента поверхностного натяжения электролитов и поведение двойного электрического слоя на границе воздух–электролит в электрическом поле.

Значение эффективной напряженности электрического поля в зависимости от полярности электролитного электрода

Полярность электролита	$\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м ³	Диаметр электрода, мм	$U_{пр}$, кВ	$s \cdot 10^{-3}$, м	φ , град	E , кВ/см
NaCl						
Положительная	1,15	2,7	6,8	1,15	64	23
Положительная	1,15	2,7	3,1	0,92	64	25
Отрицательная	1,15	2,7	4,1	0,95	65	24,2
H ₂ SO ₄						
Отрицательная	1,2	9,8	9,6	1,94	64	20,3
Положительная	1,2	9,8	9,1	1,82	64	20,3
Положительная	1,2	9,8	3,15	0,72	64	23,4

В работе [6] для небольших межэлектродных промежутков минимальное напряжение пробоя оценивается выражением

$$(U)_{min} = (4\pi\rho g)^{1/2} \cdot h^{3/2}, \quad (5)$$

где h – межэлектродное расстояние, м.

Определенные из этого выражения значения минимальной величины напряжения, при котором осуществляется пробой разрядного промежутка, близки к экспериментальным значениям, полученными нами.

В области напряжений, в которой подъем свободной поверхности жидкости отсутствует или наблюдается образование впадины на поверхности электролитного электрода, средняя напряженность электрического поля в межэлектродном промежутке для электродов диаметром 2,7 и 9,8 мм соответственно равна 1500 и 1800 кВ/м. Для металлического острия при положительной и отрицательной его полярности средняя напряженность электрического поля соответственно равна 820 и 950 кВ/м.

Сравнивая полученные пробивные характеристики для системы, состоящей из металлического и электролитного электродов, с пробивными характеристиками для металлических электродов той же конфигурации в воздухе при атмосферном давлении [7], можно отметить, что они одинаковы. Когда на поверхности электролитного электрода образуется впадина, провести такое

сравнение невозможно, так как для такой конфигурации в литературе пробивные характеристики отсутствуют. Таким образом, наличие электролитного электрода не оказывает влияния на величину пробивного напряжения. По-видимому, на пробой газового промежутка с электролитным электродом воздействуют лишь процессы ионизации в нем, а эмиссионные свойства электролитов не имеют существенного значения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Прокопович Л.И. Механические эффекты при коронном разряде между острием и плоскостью // ЖТФ. 1996. Т. 36. Вып. 4. С. 643–645.
2. Ратников Э.А. Механическая сила, возбужденная на коронирующем электроде // Известия вузов. Физика. 1968. № 2. С. 128–132.
3. Ратников Э.А. Влияние температуры коронирующего электрода на электрические и механические параметры коронного разряда. Автореф. дис. канд. физ.-мат. наук. Минск, 1969.
4. Paluch M. Elektryczny potencjal powierzchniowy i napiecie powierzchniowy roztworow wodnych niektorych alifatycznych okeymow // Roczn. chem. 1968. Vol. 42. N 10. P. 1697–1703.
5. Jarvis N., Scheiman M. Surface Potentiale of Aqueous Electrolyte solutions // J. Phys. Chem. 1968. Vol. 72. N 1. P. 74–78.
6. Брискман В.А., Шайдунов Г.Ф. Параметрическое возбуждение неустойчивости жидкости в магнитном и электрическом полях // Магнитная гидродинамика. 1969. № 3. С. 15–19.
7. Мик Дж., Крэгс Дж. Электрический пробой в газах. М., 1960.

Поступила 14.02.2001

Summary

The disruptive discharge of air gap between metallic and electrolytic electrodes have been studied. The dependence of sparking voltage and height of solution lifting from electroconductivity and polarity at changing of voltage from 3 to 20 kV.

И.М. Панченко, М.С. Панченко

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ НА ПРОЦЕСС ПЕРЕНОСА ТЕПЛА ВО ВЛАЖНОМ МАКРОПОРИСТОМ ТЕЛЕ

*Ровенский государственный гуманитарный университет,
ул. Остафова, 39, г. Ровно, 33028, Украина*

Научно-технический прогресс в разных областях техники неразрывно связан с ростом удельных мощностей и предъявляет все более высокие требования к работе самой разнообразной аппаратуры и оборудования. Это способствует внедрению более современных методов интенсификации теплообмена и создания надежно управляемых потоков теплоносителей. Наличие в аппаратуре и оборудовании электрических полей (ЭП) высокой напряженности E предполагает расширение и углубление исследования тепло- и массообмена в ЭП [1]. В настоящее время управление взаимосвязанными и взаимообусловленными потоками тепла и массы во влажных телах в условиях действия внешних ЭП – актуальная, но вместе с тем сложная задача, решение которой носит характер, далеко не удовлетворяющий требованиям технологии и современной организации производственных процессов.

Во влажном капиллярно-пористом теле вместе с кондуктивным переносом энергии в виде тепла через скелет пористого тела и внутривещное вещество происходит перенос теплосодержания

и за счет внутреннего массопереноса этого вещества, на который в значительной степени влияет силовое воздействие ЭП [2]. Поэтому теплообмен и теплопроводность во влажных телах, на которые наложены разнообразные ЭП, должны рассматриваться в неразрывной связи с массообменом. Следовательно, задача определения термических коэффициентов влажных тел, находящихся во внешних ЭП, приобретает решающее значение.

При наличии тепло- и массообмена во влажном теле основной закон теплопроводности имеет вид [3]

$$j_T = -\lambda \nabla T + \sum_i h_i j_i, \quad (1)$$

где j_T – плотность потока тепла; λ – истинный коэффициент теплопроводности твердого скелета сухого пористого тела; j_i – поток влаги в виде пара, жидкости или других субстанций; h_i – удельное теплосодержание того или иного потока внутри тела; ∇T – градиент температуры.

Экспериментально определяемый коэффициент теплопроводности влажного тела по формуле

$$\lambda_{\text{эф}} = \frac{j_T}{\nabla T} \quad (2)$$

дает не истинный, а эффективный коэффициент теплопроводности $\lambda_{\text{эф}}$. В случае аддитивности он должен представляться выражением

$$\lambda_{\text{эф}} = \lambda + \lambda_l + \lambda_k + \lambda_g + \lambda_n + \lambda_{\text{жс}}, \quad (3)$$

где λ – коэффициент молекулярной (атомной) теплопроводности твердого скелета пористого тела, λ_l – коэффициент лучистой теплопроводности между стенками пор, λ_k – коэффициент конвективной теплопроводности газовой среды в порах, λ_g , λ_n , $\lambda_{\text{жс}}$ – соответственно коэффициенты теплопроводности через внутривоздушный воздух, пар и влагу в виде жидкости (адсорбционные, смачивающие пленки, капиллярная влага).

Как известно [3], когда диаметр пор меньше $5 \cdot 10^{-5}$ м конвективным и лучистым теплообменом при перепаде температур между стенками пор $\Delta T \approx 10$ К практически можно пренебречь. Следовательно, в сухом капиллярно-пористом теле (радиусы капилляров меньше 10^{-5} м) при умеренных перепадах температуры передача тепла конвекцией и излучением ничтожно мала по сравнению с истинной теплопроводностью.

В микрокапиллярах коэффициент теплопроводности воздуха прямо пропорционален давлению газа и радиусу капилляра, поэтому он не является постоянной величиной. Механизм переноса тепла и массы в микрокапиллярах определяется молекулярным (кнудсеновским течением). Но количество молекул воздуха в увлажненных микрокапиллярах очень мало по сравнению с количеством молекул пара над пленкой адсорбционно-связанной влаги. Их отношение составляет примерно 10^{-5} [2, 3]. Следовательно, передача тепла в микрокапиллярах влажных капиллярно-пористых тел в основном происходит путем молекулярной (атомной) теплопроводности через скелет тела и внутривоздушное связанное вещество (жидкость и пар). Но в не полностью насыщенных влагой макрокапиллярах количество молекул воздуха уже превышает число молекул пара, находящихся в динамическом равновесии со смачивающими пленками воды и менисками влаги капиллярного состояния.

Существует немало работ, например, [3–6], посвященных исследованию зависимости коэффициента теплопроводности от влагосодержания U при данной пористости дисперсных тел. Во всех работах отмечается, что $\lambda_{\text{эф}}$ в основном значительно увеличивается при уменьшении коэффициента пористости дисперсных тел и росте их влажности при заданной пористости.

В неоднородном электрическом поле (НЭП) при наличии термических и влажностных полей перенос влаги обусловлен действием не только сил диффузии (∇U), термодиффузии (∇T), но и влиянием пондеромоторных сил, обусловленных НЭП, на отдельные молекулы водяного пара и воздуха ($\sim \nabla E$), адсорбционные и смачивающие пленки, на разобщенные столбики влаги капиллярной конденсации в микропорах и столбики влаги капиллярного состояния в макропорах ($\sim E \nabla E$) [7] и электроосмотических сил ($nL_{\pm}qE$), где n – гидратационное число иона с зарядом q ; L_{\pm} – феноменологический коэффициент, включающий в себя и коэффициент диффузии гидратированных ионов. Последний вид электровлагодиффузии характерен лишь для постоянного ЭП.

В общем случае поток влаги во влагонасыщенном теле будет в соответствии с уравнением Онсагера определяться соотношением

$$J = -\lambda_m \nabla U - \lambda_T \nabla T + \lambda_E \nabla E + \lambda_{\phi} \nabla \phi. \quad (4)$$

Таким образом, на величину $\lambda_{\text{эф}}$ влажного пористого тела должны влиять градиенты влагосодержания U , температуры T , напряженности E и потенциала ϕ ЭП. Поэтому в выражение (3) в случае действия во влажном пористом теле НЭП, как дополнительные составляющие должны входить термогради-

ентный коэффициент теплопроводности λ_m , обусловленный термодиффузией влаги, коэффициент электровлагодиффузионной теплопроводности $\lambda_{\text{всм}}$ и коэффициент электроосмотической теплопроводности $\lambda_{\text{эот}}$. Тогда при условии аддитивности и в случае воздействия ЭП на влажное тело, в котором присутствуют микро- и макропоры, $\lambda_{\text{эф}}$ должен представляться выражением

$$\lambda_{\text{эф}} = \lambda + \lambda_l + \lambda_k + \lambda_g + \lambda_n + \lambda_{\text{жс}} + \lambda_m + \lambda_{\text{всм}} + \lambda_{\text{эот}} . \quad (5)$$

В результате во влажных телах, пребывающих под воздействием внешнего ЭП, отношение эффективного коэффициента теплопроводности к истинному $\left(\frac{\lambda_{\text{эф}}}{\lambda}\right)_{\text{ЭП}}$ должно быть больше на величину

$$K_{\lambda_{\text{ЭП}}} = \frac{\lambda_{\text{эф}} - \lambda}{\lambda} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} . \quad (6)$$

Эту безразмерную величину можно, следуя [3], назвать критерием теплопроводности влажных тел в ЭП.

Направленное перемещение жидкости во влагонасыщенном пористом теле под действием приложенной разности потенциалов (электроосмос) изучено достаточно полно. Согласно уравнению Гельмгольца-Смолуховского линейная скорость движения жидкости относительно пористой мембраны

$$U_0 = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{\xi}{\eta} E , \quad (7)$$

то есть она прямо пропорционально зависит от напряженности ЭП.

При неполном влагонасыщении пористого тела на влагоперенос в постоянном, а тем более в переменном невысокой частоты, ЭП в основном влияет НЭП. Это воздействие распространяется на отдельные дипольные молекулы водяного пара и воздуха, на удельные объемы дискретных и сплошных водных пленок на поверхности микро- и макрокапилляров и столбики объемного капиллярного конденсата в микрокапиллярах или жидкости капиллярного состояния в макрокапиллярах. В первом случае скорость перемещения молекул прямо пропорциональна ∇E , в остальных – $E \nabla E$ [7, 8].

Таким образом, на процесс теплопереноса в достаточно влажном микропористом теле несомненно должны влиять постоянные однородные и неоднородные ЭП. В переменных ЭП невысокой частоты такое влияние может оказывать только НЭП [9]. В грубодисперсных телах (диаметр макропор больше 10^{-5} м) должна проявляться дополнительная интенсификация взаимосвязанного тепломассопереноса за счет явления тепловой конвекции, электроконвекции водяного пара и газов воздуха [1]. В таких телах “чистая” теплопроводность при значительных перепадах температуры ($\Delta T > 10$ К) между стенками капилляра возрастает за счет лучистого теплообмена.

Насколько нам известно, до настоящего времени исследования, где определялся бы эффективный коэффициент теплопроводности во влажном материале в условиях воздействия на него ЭП, в том числе высокой напряженности, не проводились. Это и послужило поводом для экспериментальных работ такого рода. Из существующих методов экспериментальных исследований $\lambda_{\text{эф}}$ выбран универсальный метод Н.Н.Бабьева [3]. В нашей модификации он представляется дальнейшим развитием методов определения термовлагокоэффициентов из одного и того же опыта в условиях воздействия ЭП.

Основной частью установки служит фторопластовый цилиндр (длина 150 мм, диаметр 25 мм), подвешенный своими концами к коромыслу аналитических весов АДВ-200. Расстояние между точками подвеса, равное 140 мм, в точности равно расстоянию между призмами коромысла весов. Часть цилиндра (115 мм по длине) залита парафином (эталонным материалом), а остальная часть (35 мм) заполняется исследуемым материалом. Парафин обеспечивает влагоизоляцию одного конца слоя исследуемого материала. Второй слой материала (торец цилиндра) закрывается диском из медной фольги толщиной 0,1 мм и диаметром 50 мм. Медный диск также обеспечивает хорошую влагоизоляцию. Вместе с тем он является электродом и выравнивает температуру по сечению цилиндра, предотвращая проникновение инфракрасных лучей в торец цилиндра, который нагревается лучистым потоком от лампы инфракрасного излучения. Вторым электродом служит тонкая медная проволока, пропущенная по оси цилиндра через парафин. Она заканчивается на границе между парафином и образцом. Температура измеряется термомпарами в специальных точках: 1) в плоскости соприкосновения медного диска и исследуемого материала, т.е. на внутренней поверхности диска T_1 ; 2) в середине слоя исследуемого материала T_m ; 3) в плоскости соприкосновения материала и парафина T_2 ; 4) в парафине на расстоянии 20 мм от второго торца цилиндра T_0 . Для защиты цилиндра

от влияния потоков воздуха он помещался в специальный термостат. Опыт ставился таким образом: свободный от парафина конец цилиндра заполнялся образцом пористого тела с известным влагосодержанием, а затем закрывался диском, места соединения дополнительно покрывались специальным термостойким и гидрофобным лаком. После уравнивания цилиндра включался источник постоянного напряжения и лампа инфракрасного излучения и одновременно регистрировалось время по электронному секундомеру. Затем с помощью показания термопар регистрировалась разность температур $(T_1 - T_0)$ и $(T_2 - T_0)$.

Имея эти данные, можно определить термические коэффициенты по соответствующим расчетным формулам. Эти расчетные формулы выводятся из решения следующей задачи теплопроводности [3]: ограниченный стержень длиной R (исследуемый материал) одним концом соприкасается с полуграниченным стержнем (парафин), второй конец ограниченного стержня нагревается постоянным лучистым потоком ($q = const$). Теплоотдача с боковой поверхности стержней отсутствует. Из постановки задачи следует: 1) температура в удаленной точке T_0 не должна изменяться в течение опыта (моделирование полуграниченного стержня); 2) теплоотдача с открытого конца стержня по сравнению с поглощаемым лучистым потоком может быть принята ничтожно малой. В частности, λ_{ϕ} вычислялся по формуле

$$\lambda_{\phi} = \lambda_{\phi} \left(\frac{1-h}{1+h} \right) \sqrt{\frac{a}{a_0}}, \quad (8)$$

где индекс “э” относится к эталону (парафину); a и a_0 – коэффициент температуропроводности в английской и американской литературе они называются коэффициентами диффузии тепла (thermal diffusivity), а немецкой литературе – коэффициентами температуропроводности (temperaturleitzaal); h – вспомогательная величина, определяется по формуле

$$h = \frac{\operatorname{ierfc} \frac{1}{2\sqrt{Fo}} - 0,5642 \frac{N_1}{N_2}}{\operatorname{ierfc} \frac{1}{2\sqrt{Fo}} - \frac{N_1}{N_2} \operatorname{ierfc} \frac{1}{\sqrt{Fo}}}, \quad (9)$$

где N_1/N_2 – отношение показаний гальванометра для термопар 1 и 2 в промежутке времени τ_1 ; Fo – критерий Фурье для данного промежутка времени τ_1 и

$$\operatorname{ierfc} x = \int_x^{\infty} \operatorname{erfc} \xi d\xi = \frac{1}{\pi} e^{-x^2} - x \operatorname{erfc} x. \quad (10)$$

Полученные термические коэффициенты образца относились к средней температуре тела T_m и к среднему градиенту ЭП. Обычно на все замеры уходила 10 – 15 минут, включая регистрацию показаний аналитических весов в различное время и распределение температуры в слое материала в конце опыта. Так как распределение температуры близко к линейному, то достаточно отметить только перепад температур $\Delta T = T_2 - T_1$.

Следует отметить, что измерение температуры в материале проводилось термопарами с соблюдением рекомендаций, приведенных в [9]: термопары были укороченными, малого диаметра, во время наложения ЭП отключались от гальванометра, измерение температуры материала проводилось при отключенном ЭП.

В качестве объекта исследования использовался кварцевый песок ($\rho = 1670 \text{ кг/м}^3$) с эффективным размером почти сферических зерен $R \approx 0,25 \text{ мм}$. Для удаления возможных органических примесей песок прокаливался в электрической тигельной печи при 773 К в течении трех часов. Затем песок промывался дистиллированной водой. Перед опытами он сушился в сушильном шкафу при 393 К на протяжении 10 часов до постоянного веса. Определение адсорбционно связанной влаги в образце осуществлялось на сорбционных вакуумных весах [8]. Величины влагосодержаний макрокапиллярной (межзерновой) влаги стыкового, канатного и капиллярного состояний определялись по методу термограмм сушки [2]. Механическим встряхиванием достигалось максимальное уплотнение и можно считать, что укладка частиц была гексагональная. Поровое пространство приобретает очень сложное очертание. При этом каждая частица соприкасается с двенадцатью соседними частицами. Пористость такой системы составляет 25,95%.

Элементарные поры имеют двоякую форму: тетраэдрическую и ромбоэдрическую; число последних в два раза превышает число первых. Радиус наиболее узких проходов равен $0,155 R$. Радиусы шаров, вписанных в тетраэдрическую и ромбоэдрическую поры, то есть поперечники последних в наиболее широкой части, равны: для поры тетраэдрической – $0,288 R$, для поры ромбо-

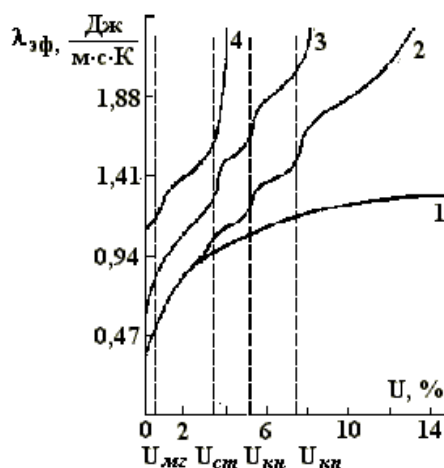
эдрической – 0,414 R. Доля объема, который приходится на поры тетраэдрические, равна 7,37%, а на поры ромбоэдрические – 18,58%.

Такая дисперсная система представляет собой тело, пронизанное капиллярными трубками с кривой осью, которая совпадает с ходом поверхности сферических частиц. Капилляры представляются в сечении треугольными; площадь их поперечного сечения испытывает правильные чередующиеся изменения от некоторого максимума до минимума.

Согласно [10], слой такого песка можно считать грубопористой системой с однородным составом макрокапилляров. Такая пористая система является наиболее простой моделью реальных капиллярно-пористых тел, используя которую можно производить расчеты термовлажностных коэффициентов и сравнивать их с экспериментальными.

Погрешность определения в НЭП с градиентами напряженности $0 \leq \nabla E \leq 5 \cdot 10^9$ В/м² составляла 3%. В наихудшем случае (в перед пробойной области значений E) погрешность экспериментов не превышала 15% для доверительной вероятности 0,95 при коэффициенте Стьюдента 4,3, что полностью соответствует практике теплофизических измерений.

Из рисунка видно, что коэффициент $\lambda_{эф}$ увеличивается с ростом влагосодержания кварцевого песка. Пунктирными линиями отмечено различное состояние влаги в макрокапиллярах: МГ – максимальное гигроскопическое, СТ – стыковое, КН – канатное и КП – капиллярное. Кривая 1 зависимости $\lambda_{эф}(U)$ аналогична кривым без поля для кварцевого песка разных фракций [2, 3]. При малых влагосодержаниях, то есть в области адсорбционно связанной влаги, коэффициент $\lambda_{эф}$ увеличивается достаточно медленно, что свидетельствует о незначительной интенсификации теплопереноса за счет молекулярной теплопроводности пленки адсорбированной влаги и паровой фазы над ней. Это связано с тем, что подвижность адсорбированных молекул мала вследствие большой энергии связи их с адсорбционными центрами песка, а концентрация молекул водяной пары незначительная. В связи с малостью толщины полимолекулярной пленки (10^{-9} м) интенсивность термокапиллярного потока в ней также незначительна. При отсутствии в частицах песка микрокапилляров капиллярная конденсация водяного пара в нем не осуществляется и поэтому влагосодержание полимолекулярно связанной влаги составляет $U_{мг}$. Концентрация водяного пара при $U > U_{мг}$ в межзеренном пространстве уже будет значительной, ибо его давление практически будет равно давлению насыщенного пара над свободной поверхностью воды при данной температуре. Понятно, что макропоры межзеренного пространства будут заполнены паро-воздушной смесью, давление которой будет равно атмосферному. Концентрация молекул газов воздуха уже значительно превышает концентрацию молекул воды. Это приводит к дальнейшему возрастанию теплопереноса за счет молекулярной теплопроводности парогазовой среды и молярной термодиффузии газовой смеси против градиента температуры, а водяного пара в направлении градиента температуры. Это вызывает циркуляцию парогазовой фазы в закрытой системе макропор. Последнее стимулирует значительный отток теплоты от нагретой поверхности.



Зависимость эффективного коэффициента теплопроводности $\lambda_{эф}$ от влагосодержания U кварцевого песка при средней температуре 305 K и градиентах электрического поля ∇E , В/см²; 1 – 0; 2 – $1,3 \cdot 10^5$; 3 – $8 \cdot 10^7$; 4 – $5 \cdot 10^9$.

Таким образом, в области $U_{мг} < U < U_{ст}$, коэффициент $\lambda_{эф}$ резко увеличивается (почти в два раза), что свидетельствует о значительной интенсификации теплопереноса за счет теплопроводности парогазовой смеси, термодиффузии и молярных потоков при циркуляции парогазовой смеси по

системе закрытых макропор. С дальнейшим увеличением влагосодержания возникают и утолщаются вокруг точек контакта частиц скопления заземленной жидкости, которые имеют вид двояковогнутой линзы (жидкостная манжета или стыковая жидкость). Их тепловое сопротивление меньше, чем у песка и они являются дополнительными тепловыми мостиками между соседними частицами и вместе с тем увеличивают площадь теплового контакта между ними. Но объем парогазовой смеси в порах уменьшается. К тому же подвижность молекул в разобщенных жидкостных манжетах меньшая, чем в парогазовой среде, поэтому интенсивность роста $\lambda_{\text{эф}}$ замедляется. С переходом от стыкового в канатное состояние, когда пленки влаги значительно утолщаются и непрерывно покрывают все частицы, происходит дальнейшее увеличение $\lambda_{\text{эф}}$, поскольку осуществляется термокапиллярный перенос воды в пленках вдоль всей внутренней поверхности образца. Одновременно происходит дальнейшее падение темпа роста величины $\lambda_{\text{эф}}$, так как продолжает уменьшаться объем парогазовой фазы (состояние заземленной паровоздушной смеси). С переходом в область капиллярного состояния (отдельные разобщенные пузырьками столбики жидкости) $\lambda_{\text{эф}}$ растет вследствие молярного термоградиентного движения жидкости в смачивающих пленках в направлении потока тепла. Содействует переносу тепла и проталкивание нагретых столбиков жидкости к холодному концу образца при расширении пузырьков с ростом их температуры. Но поскольку объем заземленного между столбиками жидкости воздуха резко уменьшается, то темп роста $\lambda_{\text{эф}}$ также существенно уменьшается, а величина $\lambda_{\text{эф}}$ при слиянии столбиков приближается в области $U > 14\%$, увеличивается более чем в 2 раза по сравнению с теплопроводностью свободного объема воды. Следовательно, проявляются и другие механизмы теплопроводности. В частности, в макропорах находится не дистиллированная вода, а электролит вследствие привнесения из окружающей среды ионов, а главное, растворения поверхностного слоя кварца [11]. Поэтому возникает дополнительный перенос тепла в растворе (термодиффузия растворенных веществ в классическом понимании Максвелла-Чепмана). Эта относительная термодиффузия вызвана взаимодействием растворенных частиц с молекулами растворителя. Исходя из феноменологических представлений Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшиц [12] получили выражение для плотности потока тепла

$$q = \left[k_T \left(\frac{\partial \mu}{\partial c} \right)_{p,T} - T \left(\frac{\partial \mu}{\partial T} \right)_{p,c} + \mu \right] i - \chi \nabla T, \quad (11)$$

где

$$i = -\rho D \left(\nabla c + \frac{k_T}{T} \nabla T \right) \quad (13)$$

диффузионный поток растворенного вещества. В закрытых капиллярах при наличии температурного градиента может иметь место циркуляция жидкости по той же схеме, как и в случае теплового скольжения газа. Вблизи стенок жидкость движется в сторону горячего конца, а в центре – в обратную сторону, отводя нагретую жидкость к холодному концу [2, 3].

Наложение НЭП со сравнительно незначительным градиентом $\nabla E = 1,3 \cdot 10^5 \text{ В/м}^2$ (кривая 2) заметным образом начинает проявляться лишь при подходе к влагосодержанию стыкового состояния и в момент образования достаточно толстых водных манжет наблюдается определенный перелом в ходе кривой зависимости $\lambda_{\text{эф}}(U)$. Это объясняется уменьшением термического сопротивления влажной дисперсной системы за счет перемещения влаги в пределах жидкостной манжеты под действием пондеромоторных сил в сторону возрастающих значений E^2 ЭП, то есть по потоку тепла. Содействует некоторому увеличению теплопотока и электродиффузия молекул водяной пары в направлении ∇E . С переходом в область канатного состояния влаги подобное диэлектропленочное движение возникает по всей поверхности макропор и поэтому возникает очередной, более четкий скачок величины $\lambda_{\text{эф}}$. Следующий скачок величины $\lambda_{\text{эф}}$ осуществляется при переходе в капиллярное состояние влаги, когда в пондеромоторное движение в направлении противоположном ∇T приходят объемные, разобщенные столбики жидкости, перенося с собой теплосодержание системы.

Увеличение U свыше $U_{\text{кп}}$ приводит к постепенному слиянию разобщенных столбиков жидкости, а следовательно, к замыканию водными каналами электродов. В результате возникает электроосмотический перенос влаги. При дальнейшем увеличении U все большее количество водных каналов подключается к электродам и все большее количество тепла переносится при электроосмотическом движении влаги. Поэтому $\lambda_{\text{эф}}$ почти линейно возрастает с увеличением $U > U_{\text{кп}}$. Выделяющееся джоулево тепло в процессе электроосмоса, в связи с малостью величины тока ($0 < I < 10 \text{ мкА}$), заметным образом не влияло на разность температур в образце, что проверялось специальными опытами. При достижении $I = 10 \text{ мкА}$ автоматическая защита маломощного источника высокого

напряжения “Разряд-1” отключала наложенное ЭП. Эта процедура отмечена окончанием кривых $\lambda_{\rightarrow\phi}(U)$. Таким образом, сингулярные точки на кривой $\lambda_{\rightarrow\phi}(U)$ при наложении НЭП достаточно надежно отмечают влагосодержания, соответствующие различным состояниям влаги в макропорах грубодисперсного тела.

Дальнейшее увеличение напряжения на образце при $U \geq 0\%$ приводит к возрастанию ∇E , а следовательно к интенсификации электровлагопереноса, переходящего в паровой фазе в электроконвекцию, и как видно из рисунка кривые $\lambda_{\rightarrow\phi}(U)$ размещаются все выше. Величине $\nabla E = 5 \cdot 10^9$ В/м² отвечает перед пробойное напряжение, когда даже в сухом образце в макропорах возникают частичные разряды, существенно интенсифицирующие теплоперенос в пористом теле. Это обусловлено возникновением световых и ударных микроволн, ионизирующих и турбулизирующих паровоздушную смесь в макропорах. В результате парогазовая фаза приходит в интенсивное молярное движение и легче проталкивается через макропоры в направлении потока тепла. Наличие в макропорах свободных зарядов вызывает действующие на единицу заряженного объема парогазовой смеси кулоновские силы, на несколько порядков превышающие пондеромоторные, оказывающие силовое воздействие на единичный объем незаряженного диэлектрика.

Таким образом, приведенные теоретический анализ и экспериментальные данные несомненно свидетельствуют о существенной интенсификации теплопереноса во влажном макропористом теле при наложении внешних электрических полей. Практическим подтверждением этого является успешная работа электрогидродинамических тепловых труб [1], а также интенсификация процесса сушки при воздействии полей [2, 7, 9].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Болога М.К., Смирнов Г.Ф., Дидковский А.Б., Климов С.М.* Теплообмен при кипении и конденсации в электрическом поле. Кишинев, 1987.
2. *Лыков А.В.* Теория сушки. М., 1968.
3. *Лыков А.В.* Явления переноса в капиллярно-пористых телах. М., 1954.
4. *Чудновский А.Ф.* Теплофизические характеристики дисперсных материалов. М., 1962.
5. *Кобранова В.Н.* Физические свойства горных пород. М., 1962.
6. *Филиппов П.И., Тимофеев А.М.* Методы определения теплофизических свойств твердых тел. Новосибирск, 1977.
7. *Панченко М.С.* Повышение эффективности процесса сушки при использовании неоднородных электрических и магнитных полей // *Электронная обработка материалов.* 1980. № 3. С. 42–47.
8. *Панченко І.М.* Вплив електричних полів на вологообмінні процеси в металонаповнених гнучколанцюгових полімерах: Дис. канд. фіз.-мат. наук. Рівне, 1998.
9. *Мустьяца В.Т.* Тепло- и массообмен во влажных материалах в электрических полях высокой частоты: Автореф. дис. доктора техн. наук. Кишинев, 1985.
10. *Лыков А.В.* Тепломассообмен (Справочник). М., 1971.
11. *Соболев В.Д., Сергеева И.П., Чураев Н.В.* Экспериментальные исследования электрокинетических явлений в тонких капиллярах: Тезисы докладов на VII конференции по поверхностным силам. М., 1980.
12. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Гидродинамика. М., 1986.

Поступила 23.10.2000

Summary

On an example of quartz sand – model macroporous solid by experimental way is shown, that constant inhomogeneous electrical fields essentially intensity the process of transposition of heat in a broad interval of moisturecontents, including hygroscopic and humid condition. Experimental dependence of effective thermal conductivity coefficient from moisturecontents $\lambda_{\rightarrow\phi}(U)$ of sand obtained with the help of upgraded classical installation created by Babiev with average temperature on a sample 305 K is determined by a porous structure of a sample, form of connection and condition of an absorbed moisture. The different magnitudes $\lambda_{\rightarrow\phi}$ for characteristic moisturecontents of sand are explained proceeding from possible mechanisms of movement of an absorbed moisture in conditions of a joint operation of an absorbed moisture in conditions of a joint operation of gradients moisture, temperature and electrical fields.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ИМПУЛЬСНОГО РАЗРЯДА В ПРОЦЕССАХ УДАЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ-КАТАЛИЗАТОРОВ ИЗ АЛМАЗНЫХ СПЕКОВ

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
А/я 255, г. Николаев-42, 327042, Украина*

В настоящее время промышленная технология синтеза искусственных алмазов заключается в воздействии высоких температур (1400–1700°C) и давлений (до 6 ГПа) на смесь графита и металлов катализаторов [1]. В качестве последних обычно используют Ni-Mn-сплав с соотношением компонентов (40–60 – 60–40%). Полученный таким способом алмазный спек подвергают процессам обогащения с использованием концентрированных растворов минеральных кислот, хромового ангидрида и других агрессивных веществ, требующих дальнейшей нейтрализации. В этой связи представляло изучить возможность замены реagentного способа обогащения алмазов на экологически более безвредный.

В данной работе представлены результаты исследований по использованию высоковольтного импульсного электрического разряда с целью интенсификации процессов растворения металл-содержащих компонентов алмазного спека.

Эксперименты выполнялись на специально разработанной установке “Лабораторная”, блок-схема которой представлена на рис.1. Кроме того, для сравнения проводили обработку на электрической установке, применяемой в процессах виброимпульсного прессования (ВИП). Рабочее напряжение (U) варьировалось в пределах 3–5 кВ, емкость зарядной батареи $C=20\text{--}24$ мкФ, частота следования импульсов $f=3\text{--}5$ Гц. Энергия в импульсе достигала ~ 300 Дж. Режим электрических разрядов выбирался таким, что на лабораторной установке он был близок к апериодическому, а на установке ВИП – хорошо выраженный колебательный. Реактор представлял собой сосуд из стеклотекстолита с титановым днищем-катодом и титановым анодом. Оптимальное соотношение площадей катода к аноду подбирались экспериментально и составляло 9. В качестве рабочей среды использовались растворы нитрата аммония, сульфата аммония, аммиак, этилендиаминтетрауксусная кислота, щелочной раствор (K_2CO_3 , КОН).

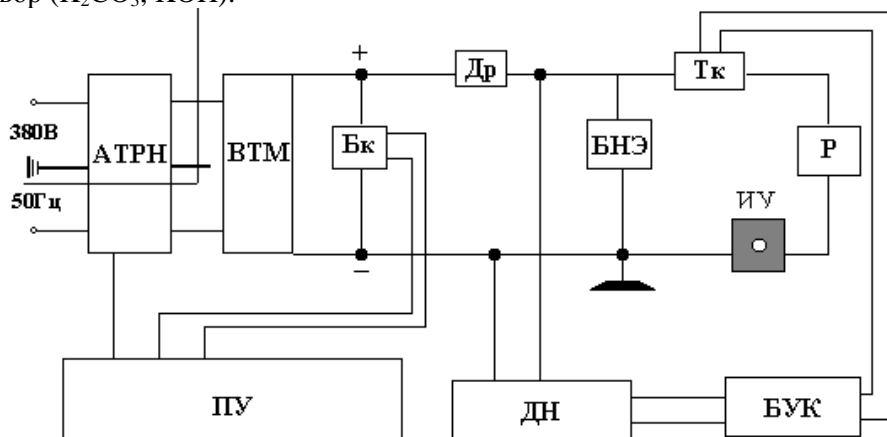


Рис. 1. Блок-схема установки “Лабораторная”:

АТРН – автоматический регулятор напряжений; ВТМ – выпрямитель-трансформатор; Бк – электроблокировка; ПУ – пульт управления; Др – токоограничивающий дроссель; БНЭ – блок накопительных элементов; ДН – делитель напряжения; ТК – тиристорный коммутатор; Р – реактор; БУК – блок управления коммутатором; ИУ – бесконтактный измеритель разрядного тока.

Степень растворения Ni-Mn определяли методом фотоколориметрического анализа на КФК-2.

Основные результаты исследований приведены в таблице. Как следует из этих данных, наиболее активным электролитом является 20% раствор нитрата аммония. При электроразрядной обработке в этом растворе растворимость металлов в Ni-Mn-сплаве и алмазном спеке возрастает по сравнению с тепловым воздействием в 4 и 3 раза соответственно. Основными продуктами растворения Ni-Mn-сплава являются нитратно-аммиакатные комплексы никеля и марганца (II). Последнее соединение неустойчиво и на воздухе окисляется до $Mn_2O_3 \cdot MnO_2$. Практически полное растворение металлических катализаторов из алмазных спеков достигалось через 30 мин обработки при прокачке электролита со скоростью 2 л/ч.

С целью определения полноты извлечения Ni-Mn – катализаторов из алмазных спеков был выполнен анализ исходных и обработанных образцов с использованием растрового электронного микроскопа “Superscope-733” фирмы “Jeol” (Япония). Сканограммы образцов выполнялись во вторичных лучах (SEI) (рис. 2,а, 2,б, 3,а,) и в характеристических лучах никеля серии K_α (рис. 3,б).

Из приведенных рисунков хорошо видно распределение никеля в *исходном* алмазном спеке (рис. 3,б). При анализе *обработанного* (п.9 таблицы) алмазного спека (рис. 2,б) в характеристических лучах K_α Ni сигнал от атомов никеля *отсутствовал*. При этом, как следует из рис. 2,б, состояние алмазных зерен после электроразрядной обработки вполне удовлетворительное.

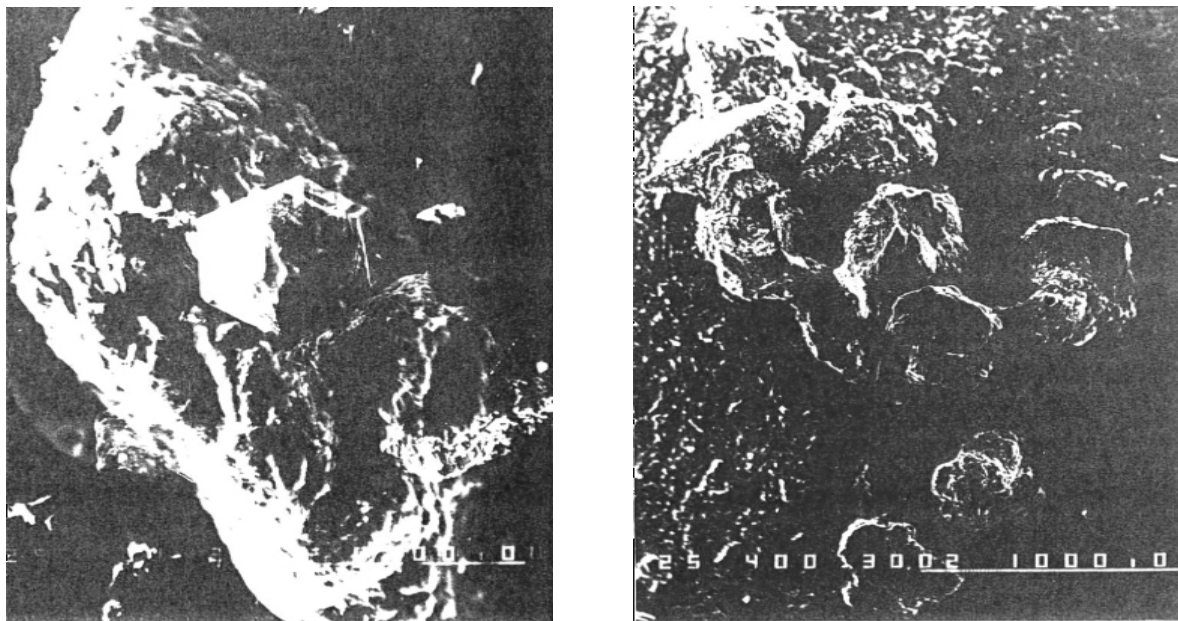
Основные результаты по растворимости металлических компонентов алмазных спеков при электроразрядной активации

№ п/п	Электролит	Условия обработки	Растворимость, %
1	20% NH_4NO_3 $\rho=0,1$ Ом·м	Установка “Лабораторная” $U=3$ кВ; $C=20$ мкФ; $f=3-4$ Гц $l_{p.n.}=3$ мм Ni-Mn $\tau=6$ мин Алмазный спек $\tau=6$ мин	3,3 3,0
2	То же	Установка ВИП $U=5$ кВ; $C=24$ мкФ; $f=3-4$ Гц $l_{p.n.}=3$ мм Ni-Mn $\tau=6$ мин Алмазный спек $\tau=6$ мин	6,0 5,0
3	То же	$T=80^\circ C$, Ni-Mn $\tau=5$ мин Ni-Mn $\tau=3,5$ час Алмазный спек $\tau=3,5$ час	0,3 4,0-5,0 2,8
4	10% $(NH_4)_2SO_4$ $\rho=0,1$ Ом·м	Установка “Лабораторная” Ni-Mn $\tau=6$ мин.	2,0
5	6%-ный ЭДТА $\rho=0,7$ Ом·м	Установка “Лабораторная” Ni-Mn $\tau=6$ мин	5,0
6	25%-ный NH_3 $\rho=9,2$ Ом·м	Установка “Лабораторная” Ni-Mn $\tau=6$ мин.	0,5
7	15% KOH 5% K_2CO_3 $\rho=4,5 \cdot 10^{-2}$ Ом·м	Установка “Лабораторная” Ni-Mn $\tau=6$ мин	0
8	20% NH_4NO_3 $\rho=0,1$ Ом·м	Установка ВИП $U=5$ кВ; $C=24$ мкФ; $f=3-4$ Гц $l_{p.n.}=3$ мм. $V_{прокачки} = 2$ л/час Ni-Mn $\tau=24$ мин	90
9	То же	То же, Алмазный спек $\tau=30$ мин	90

где ρ – удельное сопротивление электролита; $l_{p.n.}$ – межэлектродный промежуток.

Наблюдаемое увеличение скорости гетерогенного химического процесса при электроимпульсной обработке может быть, на наш взгляд, объяснено комплексным воздействием

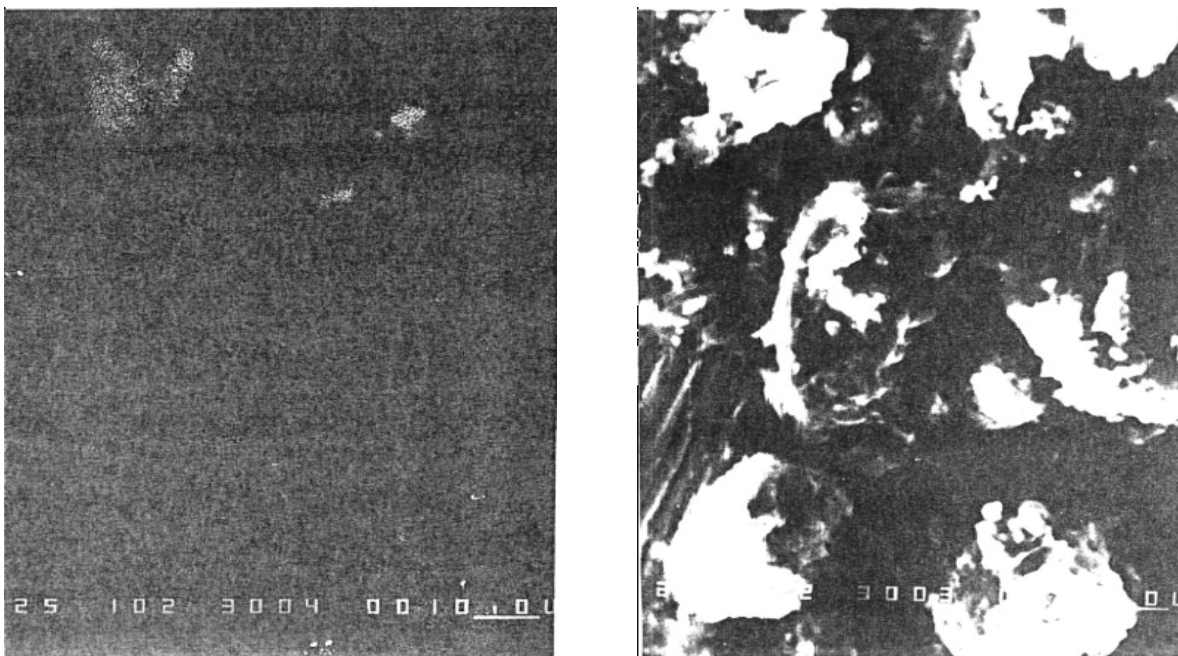
таких факторов электрического разряда в жидкости, как высокая температура в канале разряда, приводящая к расплавлению и диспергированию металлического компонента, а следовательно, к увеличению поверхности твердофазного реагента; возникающие при электрическом пробое гидропотоки, которые приводят к постоянной эвакуации продукта реакции и обновлению реагирующей поверхности; активирующее воздействие частиц плазмы и кавитационных процессов на жидкофазный реагент.



a

б

Рис. 2. Сканограммы образцов исходного алмазного спека (а) и после (б) растворения металлов-катализаторов($\times 400$, регистрация в режиме вторичных электронов).



a

б

Рис. 3. Сканограммы исходного образца алмазного спека, регистрируемые в режиме вторичных электронов (SEI)(а, $-\times 1000$) и в характеристических лучах $K_{\alpha} Ni$ (б, $-\times 1000$). (Светлые пятна на сканограмме соответствуют области локализации никеля).

Следует отметить, что электроразрядная обработка алмазных спеков в дистиллированной воде так же как и растворение катализаторов в растворе химического реагента без электроразрядной

*

обработки, не позволяет достичь такой же глубины протекания реакции растворения, как при совместном применении обоих вариантов обработки. Это свидетельствует о наличии *синергидного эффекта* в изучаемом процессе.

Таким образом, показана принципиальная возможность замены высококонцентрированных агрессивных растворов процесса обогащения алмазных спеков экологически более безвредным реагентом (нитрат аммония – это, как известно, удобрение) при совместном использовании электро-разрядной обработки и химического реагента.

Авторы выражают благодарность В.М. Скидану за предоставление возможности использования электро-разрядной установки “Лабораторная”.

ЛИТЕРАТУРА

1. Синтетические сверхтвердые материалы. В 3-х т. Т. 1. Синтез сверхтвердых материалов. Киев, 1986.

Поступила 09.10.2000

Summary

In the paper the possibility of electrodischarge processing is studied with the purpose of intensification of process of dissolution of metal catalysts which are included in a structure of synthetic diamond. It has been shown, that in this case replacement of strong solutions of acids for ecological more harmless solution of ammonium nitrate is possible. With usage of a methods of a raster submicroscopy and photometric analysis the satisfactory condition of diamond after electrodischarge treatment and practical full deleting of metals - catalysts were demonstrated. The existence of *synergistic* effect at combined using of a chemical reactant and electrodischarge treatment upon metal components diamond has been supposed.

В.В. Кучеренко, Ж.Н. Ищенко, В.В. Сидорук, Л.З. Богуславский

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОЛНОВОДНЫХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ДАВЛЕНИЯ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ ПОДВОДНОГО ИСКРОВОГО И КОРОННОГО РАЗРЯДОВ.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

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

1. Введение

Подводный искровой разряд (ПИР) характеризуется полным пробоем межэлектродного промежутка. Образованный при этом плазменный канал сплошной проводимости расширяется под действием выделенной в нем энергии разрядного контура, создавая волны давления в окружающей жидкости [1, 2]. В отличие от ПИР при коронном разряде в сильных электролитах (КР) происходит частичный пробой межэлектродного промежутка. Начиная с некоторого предельного значения проводимости жидкости ($\sigma_0 \geq 3$ См/м), разветвленная лидерная система превращается в сплошное плазменное образование, повторяющее форму поверхности острия положительного электрода и расширяющееся под действием выделенной в нем энергии [3]. Механическое действие ПИР и КР может быть сравнимым из-за сравнимого у них времени выделения энергии в разрядном промежутке. Интерес к КР возрос в связи с возможностью его практического использования [4–6].

Экспериментальные данные об импульсе давления $P(t)$ в ближней зоне ПИР и КР представляют значительный интерес при разработке технологий импульсной обработки различных материа-

лов, а также для корректного математического моделирования процесса с целью определения гидродинамических характеристик разряда. Особенно это относится к КР, слабо изученному по сравнению с ПИР.

Измерение давлений вблизи канала разряда, а особенно в его плазменной области, представляет значительные трудности. Это связано прежде всего с механическим разрушением датчика под действием высоких давлений и температур, а также с искажениями измеряемого сигнала высоким уровнем электромагнитных помех.

Наиболее достоверные сведения о гидродинамических характеристиках ПИР получены при использовании миниатюрных турмалиновых датчиков давления объемного действия (ТДД), помещаемых на значительном расстоянии от канала разряда [7–9]. Волна давления от разряда действует непосредственно на пьезоэлемент ТДД через защитный слой из затвердевшей эпоксидной смолы. Однако на показания ТДД сильно влияют высокая электропроводность электролита и пирозлектрический эффект турмалина.

Для регистрации волн давления вблизи канала ПИР [10] и КР [11, 12] пьезоэлектрические волноводные датчики давления (ПВДД), в которых пьезоэлектрический диск располагается в центре составного стержня, имеют ряд преимуществ по сравнению с другими конструкциями датчиков. Это возможность защиты пьезоэлемента от высоких давлений и температур, агрессивных и проводящих сред, электромагнитных полей и пр. [13–15].

Цель настоящей работы – исследовать возможность использования ПВДД для регистрации волн давления в ближней зоне ПИР и КР и оценки давлений в плазменном образовании КР.

2. Методика экспериментов

Апробация датчиков ПВДД проводилась с помощью ПИР, как более изученного процесса. Для сравнения использовались показания датчиков ТДД, рассчитывались значения амплитуды давления P_m по известным аналитическим зависимостям для ПИР, проводились численные расчеты P_m и $P(t)$ по известным математическим моделям ПИР и КР. Контроль режима энергетических и временных характеристик разрядов осуществлялся с помощью осциллограмм разрядного тока $I(t)$ и напряжения $U(t)$ на межэлектродном промежутке l_p .

Регистрация волн давления, образующихся при ПИР, проводилась в разрядной камере размером 0,4·0,4·0,5 м³ с системой электродов типа "стержень – стержень". Камера заполнялась водой с удельной электропроводностью $\sigma_0 \approx 3 \cdot 10^{-2}$ См/м. Стабилизация положения канала разряда осуществлялась с помощью микропроводника диаметром 0,01 мм. Предпробивные потери энергии при этом отсутствовали. Датчик давления располагался на расстоянии $r = 75$ мм над межэлектродным промежутком в его экваториальной плоскости. Такое расстояние выбрано, исходя из условия, чтобы время прихода волн сжатия к датчику было несколько больше времени протекания тока в разрядной цепи, что позволяло значительно уменьшить влияние электромагнитного поля разряда на регистрируемый сигнал. Вариация режимов разряда при запасенной энергии $W_0 = 50$ Дж осуществлялась за счет изменения длины промежутка l_p от 6,5 до 38 мм. Это позволило реализовать режимы от сильно колебательного с большой амплитудой до критического (близкого к апериодическому).

Измерение давлений, возникающих в жидкости при КР, производилось в разрядной камере цилиндрической формы, диаметром 0,12 м и высотой 0,38 м, которая заполнялась водным раствором NaCl с электропроводностью $\sigma_0 = 5–8,4$ См/м. В качестве положительного электрода использовался металлический стержень в полиэтиленовой изоляции с радиусом закругления стержня $r_s = 2,5–5$ мм. Отрицательным электродом при КР служил металлический корпус разрядной камеры.

Датчик давления располагался вертикально над электродом, соосно с ним и на расстоянии r от него. При этом r изменялось от 0 до 75 мм.

Электротехнические параметры разрядного контура изменялись в диапазоне: зарядное напряжение $U_0 = 10–30$ кВ, емкость батареи конденсаторов $C = 1–3$ мкФ, индуктивность разрядного контура $L = 2,4–3,8$ мкГн.

Измерение давлений проводилось сериями из 3–5 разрядов, результаты усреднялись. При этом отклонение от среднего значения амплитуды P_m не превышало 10%.

3. Датчики давления

В используемом для сравнения датчике ТДД чувствительный элемент состоял из двух турмалиновых пластинок размером 0,3·0,5·0,2 мм³, которые расположены под определенным углом друг к другу и приклеены к медным электродам. Корпус датчика изготовлен из эпоксидной смолы с наполнением кварцевым песком [7].

Датчик ПВДД состоял из двух цилиндрических стержней-волноводов одинакового диаметра, между которыми находилась таблетка из пьезокерамики ЦТС-19 толщиной 0,5–0,7 мм (рис. 1). Параметры использованных ПВДД (датчики Д1–Д4) приведены в таблице: длина первого волновода (предволновода) l_1 и второго l_2 ; их диаметр d , толщина пьезокерамики δ , материал, из которого выполнены волноводы, чувствительность датчиков γ .

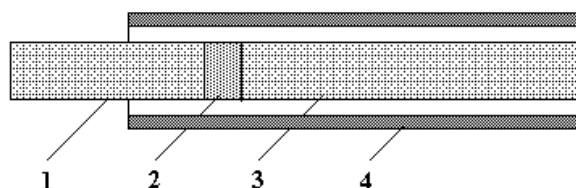


Рис. 1. Схема пьезоэлектрического волноводного датчика давления:

1 – первый волновод (предволновод); 2 – пьезокерамика; 3 – второй волновод; 4 – корпус-экран.

В предволноводе формируется плоский фронт волны с тем, чтобы обеспечить равномерное по сечению давление на пьезокерамику. Второй волновод должен обеспечить условие, при котором отраженная от его торца волна не будет вносить искажений в регистрируемый сигнал.

Значения акустического сопротивления (импеданса) материалов, из которых изготовлены волноводы и пьезоэлемент, выбирались по возможности близкими с целью значительного уменьшения колебаний сигнала за счет отражения продольных волн от границ раздела сред (медь – $3,3 \cdot 10^7$ кг/м²·с, латунь – $2,9 \cdot 10^7$ кг/м²·с, керамика – $1,7 \cdot 10^7$ кг/м²·с, пьезокерамика – $2,1 \cdot 10^7$ кг/м²·с). Однако, как отмечалось в [16], даже при идеальном совпадении импедансов материалов стержней и пьезокерамики наблюдаются радиальные колебания сигнала с датчика как следствие трехмерного эффекта механических напряжений в твердом теле. Чем меньше отношение модуля Пуассона ν к модулю Юнга E материала второго волновода, тем меньше эти колебания. Из использованных волноводов (см. таблицу) наименьшее отношение ν/E у латуни, а наибольшее – у керамики.

Параметры ПВДД

Датчик	I волновод		II волновод		d , мм	δ , мм	γ , 10^{-6} В/Па
	материал	l_1 , мм	материал	l_2 , мм			
Д1	керамика	140	керамика	140	10	0,7	7,5
Д2	медь	12	медь	100	2,5	0,5	0,96
Д3	керамика	30	керамика	107	10	0,7	5,8
Д4	керамика	24	латунь	97	4	0,7	0,91

Для уменьшения влияния электромагнитных полей датчик помещался в металлический корпус – экран. У датчика Д2 экран покрывал оба волновода, а зазор между экраном и волноводами заливался силиконовым каучуком [17]. У датчиков Д1, Д3, Д4 предволновод выступал из корпуса (см. рис. 1). Это позволяло устранить возможность электрического пробоя на корпус датчика при малых r , а особенно при $r \approx 0$.

Согласно сведениям, приведенным в [17], при $l_1/d \gg 1$ время нарастания сигнала τ_m зависит от размеров и материала стержня как

$$\tau_m \approx \nu^{2/3} (l_1/d)^{1/3} (d/c_0). \quad (1)$$

Здесь c_0 – скорость распространения продольных волн в стержне. Из расчетов по этой зависимости следует, что для датчика Д2 время $\tau_m \approx 0,5$ мкс в 8 раз меньше, чем для Д1. Соответственно значения t_ϕ – время достижения амплитуды волны давления P_m , определенные датчиком Д2, должны быть более точными.

Относительная длина предволновода l_1 , согласно сведениям из [17], должна быть $l_1 \approx (2-4)d$. Для датчика Д2, имеющего металлические волноводы, это условие выполняется. Датчик Д4, имеющий керамический предволновод малого диаметра, быстро выходил из строя из-за механического разрушения предволновода, особенно в месте крепления его к пьезокерамике.

Калибровка датчиков производилась на специальной установке для динамической калибровки широкополосных датчиков давления, работающей на принципе соударения баллистического маятника с волноводной системой [18]. При тарировке датчиков наблюдалась зависимость

чувствительности датчика от глубины его погружения в жидкость h . При $h > 30-40$ мм такая зависимость исчезала, и полученные γ использовались при экспериментальном определении $P(t)$.

Согласно [13, 14] при регистрации давления с помощью ПВДД погрешность измерений может быть обусловлена дифракцией волны на датчике, внутренними отражениями в волноводе, конечными размерами его приемной поверхности, электрическими переходными процессами в пьезокерамике и измерительной цепи, конструктивным исполнением датчика, качеством контакта пьезокерамика – волновод и пр.

4. Результаты экспериментов

Характерные осциллограммы давления $P(t)$ для ПИР, полученные с помощью датчиков ТДД (а, г) и ПВДД (б, в, д, е) для критического (а, б, в) и колебательного (г, д, е) режимов, приведены на рис. 2.

В случае критического режима ПИР осциллограмма давления представляет собой полуволну с последующими слабо выраженными колебаниями. Очевидно, что причина этих колебаний кроется в отмеченных выше погрешностях измерений давлений датчиками. В случае колебательного режима амплитуда этих колебаний значительно увеличивается.

С помощью осциллограмм тока $I(t)$ и напряжения $U(t)$ установлено, что основная доля энергии разрядного контура W_I выделяется за время первого полупериода колебаний тока τ_I . Энергия W_I и скорость ее выделения определяют амплитуду волны давления P_m и время ее достижения t_ϕ . При $l_p = 38$ мм время $\tau_I = 9,7$ мкс при длительности протекания разрядного тока $\tau_p = 22$ мкс. А при $l_p = 6,5$ мм время $\tau_I = 6,2$ мкс, $\tau_p = 70$ мкс. Различие времен τ_I и τ_p отразилось соответственно на осциллограммах $P(t)$.

Наибольшая крутизна фронта волны давления наблюдалась для сигнала с датчика Д2 (см. рис. 2, в, е). Времена t_ϕ для датчиков ТДД и Д2 близки и практически совпадают со временем достижения максимума электрической мощности N_m , рассчитанной из осциллограмм $I(t)$ и $U(t)$.

Изменение времени t_ϕ для сигналов с разных датчиков ПВДД находилось в соответствии с зависимостью (1). Так, датчик Д1, у которого диаметр волновода в 4 раза, а длина l_1 почти на порядок больше, чем у Д2 (см. таблицу), увеличивает t_ϕ в ~ 2 раза (см. рис. 2, д, е).

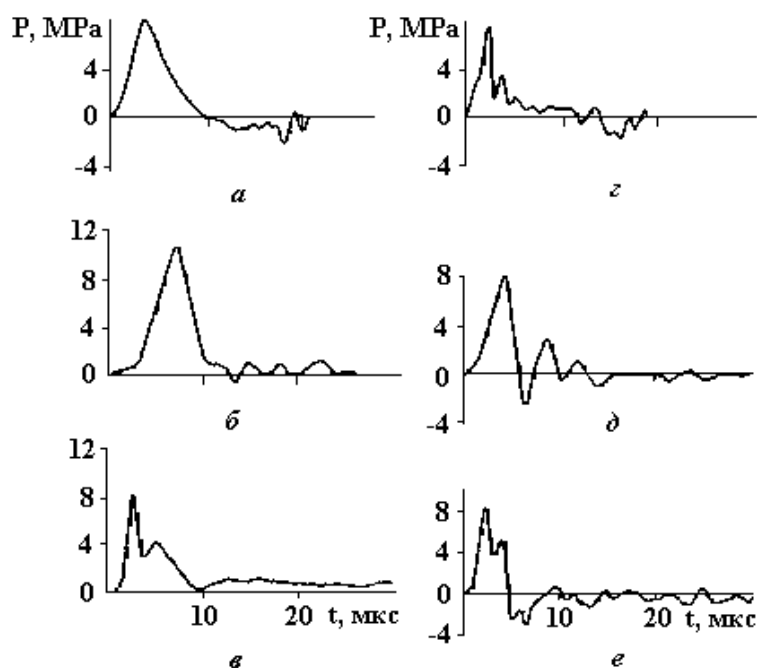


Рис. 2. Характерные осциллограммы давления в ближней зоне ПИР.

$U_0 = 10$ кВ, $C = 1$ мкФ, $r = 75$ мм: а – ТДД, $l_p = 38$ мм; б – Д1, $l_p = 38$ мм; в – Д2, $l_p = 38$ мм; г – ТДД, $l_p = 6,5$ мм; д – Д1, $l_p = 6,5$ мм; е – Д2, $l_p = 6,5$ мм.

Давление P_m для ПИР при $l_p = 38$ мм, измеренное датчиками ТДД, Д1 и Д2 составляло 8,1–11 МПа, а при $l_p = 6,5$ мм давление $P_m = 7,5-9,7$ МПа. Кривые $P(t)$ для этих режимов существенно отличаются.

В отличие от ПИР, осциллограммы $I(t)$ и $U(t)$ для КР в сильных электролитах ($\sigma_0=5-8$ См/м) имели аperiodический характер (без колебаний). Энергия разрядного контура выделялась в разрядном промежутке в течение ~ 50 мкс, причем основная ее часть, как и для ПИР, – в течение первых 10 мкс.

Характерные осциллограммы давления $P(t)$ в ближней зоне КР, полученные с помощью ПВДД (рис. 3), имеют колебательный характер, особенно с датчика Д1. По виду они близки к осциллограммам $P(t)$ для ПИР при колебательном режиме (см. рис. 2, *d,e*), сдвинутым вправо вдоль оси времени. Уменьшение радиуса электрода от 5 до 2,5 мм ведет к значительному уменьшению давления P_m амплитуды колебаний сигнала. Общим для процессов КР и ПИР при $l_p=6,5$ мм является значительно большее, по сравнению с ПИР при $l_p=38$ мм, время электрического процесса τ_p , соответственно дольше действие электромагнитного поля на сигнал с датчика.

Для КР время достижения амплитуды P_m в 2–3 раза больше, чем для ПИР, за счет нарастающих давлений перед основным сигналом (см. рис. 2, 3). Возможно, что из-за более высокого уровня давлений на осциллограммах $P(t)$ для ПИР такие низкие давления могли не фиксироваться осциллографом. Тогда t_ϕ для ПИР и КР должны быть близкими, что находится в соответствии с временем достижения амплитуды N_m на кривых мощности для этих разрядов.

Сравнение показало, что давление P_m для КР значительно ниже, чем для ПИР, при одинаковых режимах и расстояниях r . Однако при реализации КР уменьшение радиуса электрода и увеличение напряжения U_0 ведет к значительному повышению P_m .

Время появления отрицательных давлений на осциллограммах с датчика Д2 (см. рис. 3, *z,d,e*) близко ко времени двойного пробега звуковой волной давления длины медного предволновода ($\sim 6,5$ мкс).

Это свидетельствует о сильном влиянии на импульс давления граничной поверхности предволновода – вода из-за низкого акустического импеданса воды (в 22 раза ниже, чем у меди). При взаимодействии внутренних отраженных волн с торцом предволновода, граничащим с водой, внутрь стержня распространяется волна разгрузки (разрежения), которая догоняет полезный сигнал и интерферирует с ним. Это необходимо учитывать при выборе параметров предволновода l_1 .

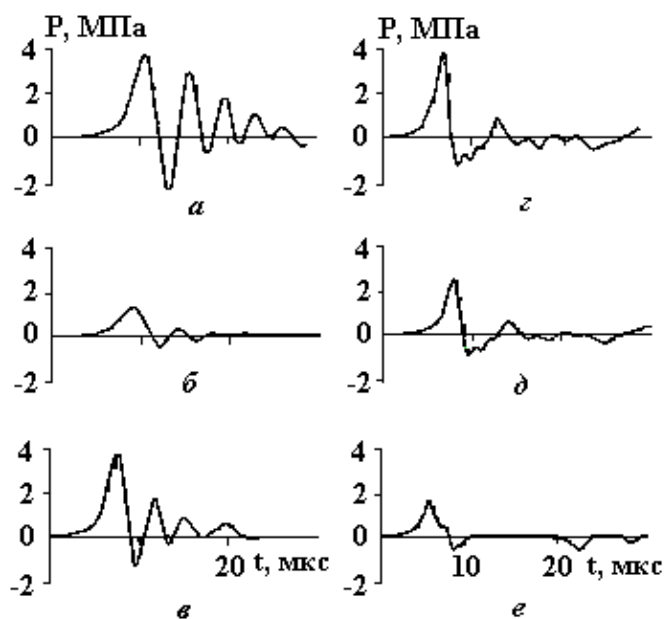


Рис. 3. Характерные осциллограммы давления в ближней зоне КР при различных режимах ($\sigma_0=5$ См/м): а – Д1, $U_0=15$ кВ, $C=1$ мкФ, $r_3=2,5$ мм, $r=15$ мм; б – Д1, $U_0=30$ кВ, $C=1$ мкФ, $r_3=5$ мм, $r=33$ мм; в – Д3, $U_0=15$ кВ, $C=1$ мкФ, $r_3=2,5$ мм, $r=33$ мм; г – Д2, $r=20$ мм; д – Д2, $r=30$ мм; е – Д2, $r=50$ мм.

Увеличение расстояния от электрода r (рис. 4) приводит к резкому уменьшению давления P_m при $r<20$ мм. Затем скорость падения P_m значительно снижается, особенно при $r>40$ мм. Такая зависимость характерна и для ПИР. По сравнению с датчиком Д1 зависимость $P_m=f(r)$ для датчика Д2 лежит несколько выше.

*

Характерные осциллограммы давления $P(t)$, полученные датчиком с неметаллическим волноводом Д1 при КР для $r=0$, приведены на рис. 5. Они в какой-то степени характеризуют давление в плазменной области коронного разряда $P_k(t)$ КР при различных режимах и радиусах электрода. Здесь, как и на рис. 3, с уменьшением радиуса r , от 5 до 2,5 мм увеличиваются максимальное давление P_k^m и колебания кривой $P_k(t)$.

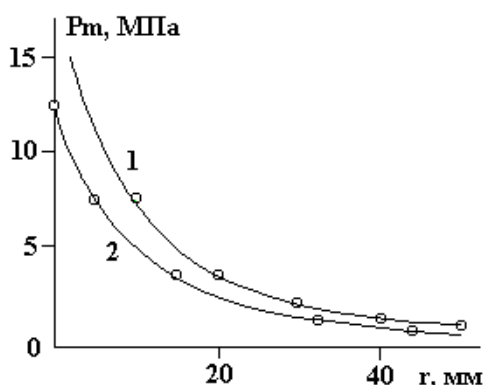


Рис. 4. Зависимость давления P_m при КР от расстояния до электрода. $U_0=15$ кВ, $C=1$ мкФ, $L=2,4$ мкГн, $r_3=5$ мм, $\sigma_0=5$ См/м; 1 – Д2; 2 – Д1.

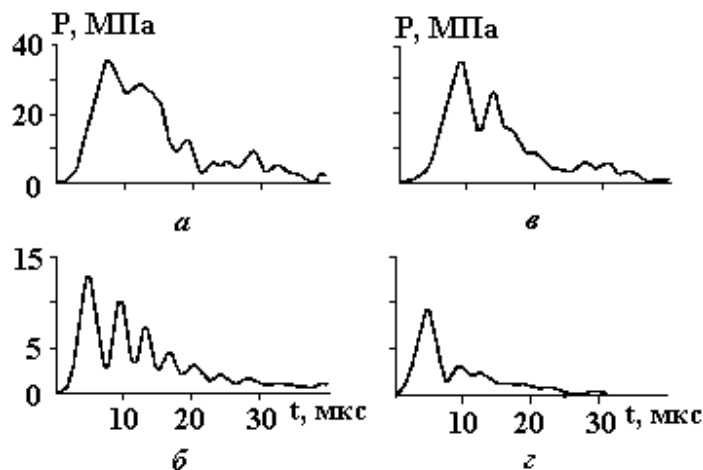


Рис. 5. Характерные осциллограммы давления КР при $r=0$ (датчик Д1): а, в – $U_0=11$ кВ, $C=3$ мкФ, $r_3=3$ мм, $\sigma_0=8,4$ См/м; $U_0=15$ кВ, $C=1$ мкФ, $\sigma_0=5$ См/м: б – $r_3=2,5$ мм, з – $r_3=5$ мм.

Следует указать на довольно быстрое разрушение пьезокерамики датчиков ПВДД, особенно при повышении напряжения U_0 . Жесткий корпус из нержавеющей стали, как у Д2, делал датчик более стойким. В проведенных исследованиях датчики выдерживали до ремонта от 10 до 60 разрядов. Чтобы избежать дополнительного искажения сигнала приходилось убирать пузырьки воздуха с торца предволновода перед каждым разрядом.

Измеренные датчиками ПВДД давления в плазменной области P_k^m для различных режимов и радиусов r , составили $1,3 \cdot 10^7 - 1,1 \cdot 10^8$ Па. Наибольшее значение P_k^m получено с помощью датчика Д4.

Авторы выражают признательность В.М. Павлихину за изготовление датчиков давления Д2 и ТДД.

ЛИТЕРАТУРА

1. Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект. М.–Л., 1955.
2. Оборудование и технологические процессы с использованием электрогидравлического эффекта / Под ред. Г.А. Гулого. М., 1977.
3. Богуславский Л.З., Кривицкий Е.В., Петриченко В.Н. Коронный разряд в водных электролитах // Теория, эксперимент, практика электроразрядных технологий. Вып.1. Киев, 1993. С. 8–13.

4. Электроискровой источник упругих волн для целей сейсморазведки / Под ред. А.В.Калинина. М., 1989.
5. Богуславский Л.З., Кривицкий Е.В., Петриченко В.Н. Плазменные фильтры для обеззараживания сточных вод // Электронная обработка материалов. 1995. № 1. С. 22–26.
6. Рогов И.А., Афанасьев Э.Э., Гавриленкова Т.Е. Применение импульсных электрических разрядов в сильных электролитах для интенсификации массообменных процессов // Там же. 1977. № 1. С. 35–36.
7. Синани И.Б. Турмалиновые индикаторы ударных волн в жидкостях // Приборы и техника эксперимента. 1957. № 4. С.85–89.
8. Синани И.Б. Устранение некоторых искажений при регистрации ударных волн в воде // Журн. прикл. механ. и техн. физики. 1960. № 2. С. 128–131.
9. Окунь И.З. Исследование волн сжатия, возникающих при импульсном разряде в воде // Журн. техн. физики. 1971. Т. 41. Вып. 2. С. 292–301.
10. Кучеренко В.В. Экспериментальные исследования гидродинамических явлений электрического разряда в воде // Теория, эксперимент, практика электроразрядных технологий. Вып. 2. Киев, 1995. С. 20–25.
11. Богуславский Л.З., Кучеренко В.В., Кривицкий Е.В. Динамика импульсного коронного разряда в водных электролитах. Николаев, 1993. (Препринт/НАН Украины, ИИПТ №22).
12. Глуценко В.Ж., Жекул В.Г., Трофимова Л.П. Динамика импульсного электрического разряда в сильнопроводящих водных электролитах в условиях высоких гидростатических давлений // Теория, эксперимент, практика электроразрядных технологий. Вып. 2. Киев, 1995. С. 4–7.
13. Бескаравайный Н.М., Поздеев В.А. Теоретические основы измерения импульсных давлений в жидких средах. Киев, 1981.
14. Джонс и Власс. Датчики давления для исследований в области динамики плазмы и детонации // Приборы для научных исследований. 1967. № 8. С. 30–34.
15. Годонюк В.А., Журавлев Б.В., Шедько И.П. Широкополосный пьезоэлектрический датчик давления // Приборы и техника эксперимента. 1984. № 5. С. 214–217.
16. Йорк. Динамика напряжений в безынерционных пьезоэлектрических датчиках давления // Приборы для научных исследований. 1970. № 4. С. 31–33.
17. Рэгланд и Куллен. Пьезоэлектрический датчик давления с акустическим стержнем // Там же. 1967. № 6. С. 18–20.
18. Теляшов Л.Л., Чеканов Ю.С., Гнатенко Е.К. Установка для динамической калибровки широкополосных датчиков давления // Физические основы электрогидравлической обработки материалов. Киев, 1978. С.160–165.

Поступила 06.12.2000

Summary

The possibility of pressure measuring with the help of piezoelectric waveguide sensors (PWGS) in the near zone of underwater spark discharge (USD) and corona discharge (CD) in water electrolites with high values of the electrical conductivity was studied. The sensors used were distingwished by their dimensions and the waveguide material as well as by their screening. Comparison of the pressure oscillograms obtained with the use of the PWGD and the microsensors operating on the principle of volume action (Synany sensors) was conducted. Experimental data on the pressure distribution in water obtained with the use of the PWGS for USD and CD including the plasma region are presented.

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ И ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

Вал. А. Коварский*, Б.С. Филипп**

ФОТООБРАБОТКА КОРМОВ ИЗ КУКУРУЗНОЙ МУКИ ПРИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЯХ ВОЗБУЖДЕНИЯ

**Институт физиологии и санокреатологии АН РМ,
ул. Академическая, 1, г. Кишинев, МД-2028, Республика Молдова*

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

У растений существует защитный механизм против избыточного поглощения световой энергии.

При фотообработке энергия светового излучения во много раз больше, чем при освещении растения солнцем. В этих условиях образуется активный кислород, способный разрушать ткани. Тушителем активного кислорода является каротин.

Фотообработка кормов производится с использованием специальных устройств. Поглощенная световая энергия является важным параметром, определяющим их производительность. Техническим критерием оптимальной обработки муки является максимальная концентрация фотоиндуцированных (ФИ) сигналов электронного парамагнитного резонанса (ЭПР), регистрируемых радиоспектрометрами достаточной чувствительности. Результатом фотообработки муки является увеличение ее питательности для растущих животных. Фотодинамическая модель повышения обменной энергии в кормах растительного происхождения объясняет основные элементы этого процесса. Важнейшие изменения происходят в пигмент-белковых комплексах [1, 2].

В данной статье приводятся экспериментальные доказательства взаимосвязи степени фотообработки муки (по интенсивности ФИ сигналов ЭПР) с увеличением ее питательности (по привесам растущих животных). Выясняется значение величины поглощенной световой энергии в процессе фотообработки для повышения питательности корма в технологических условиях работы установки для фотообработки кормов (ФОК), а также критическое значение поглощенной энергии для этого процесса. Предложена модель положительного эффекта ФИ сигналов ЭПР для контроля возможного повышения питательности кормов.

Целью данного исследования является совершенствование технологии фотообработки и фотодинамической модели с учетом различных уровней поглощенной энергии.

Методика

1 опыт. Выявление взаимосвязи интенсивности фотообработки (по ФИ сигналам ЭПР) с питательностью муки (по привесам растущих белых крыс).

В качестве источника электромагнитного излучения использовались лампы ДРИШ-4000 с фильтрами в диапазоне 315–600 нм. Мощность ламп 4 кВт. Кукурузная мука готовилась из зерна богатых каротином гибридов роговидной кукурузы. Время облучения муки выбрано в следующих вариантах: 8, 15, 25 и 30 минут. Масса муки по 10 кг для каждой группы готовилась при тщательном перемешивании и хранилась в течение месяца в темном сухом помещении. Наличие ФИ сигналов ЭПР регистрировалось радиоспектрометром РЭ-1307. Учитывалось соотношение амплитуды первой производной сигнала ЭПР исследуемого объекта к амплитуде первой производной сигнала ЭПР марганца ($MgO \cdot Mn^{+2}$). Съемка спектров ЭПР для всех образцов производилась при одинаковом уровне СВЧ-мощности в резонаторе.

Для выявления питательности фотообработанного корма проводилось его скармливание в составе полноценного рациона растущим белым крысам линии Вистар (самцам) средним весом 130–150 г каждый. Формировалось пять групп, в каждой по 10 животных. Опыт продолжался 30 дней. Ежедневно индивидуально учитывалось количество съеденного корма. Ежедневно индивидуально животных взвешивали.

II опыт. Выявление значения величины поглощенной световой энергии в корм для повышения его питательности.

В качестве источника электромагнитного излучения использовались лампы ДРЛ-400 с фильтрами в диапазоне длин волн 315–600 нм. Лампы входили в комплекс светоизлучателя установки ФОК-3 в двух вариантах: 20 ламп (8 кВт) и 12 ламп (4,8 кВт). Скорость фотообработки регулировалась дозатором. Исследованы различные варианты обработки: 25, 30, и 50 кг муки в час.

Большая скорость обработки соответствует минимальной экспозиции. Соблюдали стандартные условия обработки (качество муки, температуру и давление газов, одинаковый режим работы перемешивающего устройства). В качестве корма использовалась мука кукурузы, аналогичная вышеописанному образцу.

Измерение ФИ сигналов ЭПР, режим кормления, формирования групп животных, учет полученных результатов, – как и в I опыте.

Расчет поглощенной световой энергии E производился по соотношению:

$$E = \frac{kWh}{M}, \quad (1)$$

где E – поглощенная энергия (кВт·час/кг корма); kW – мощность ламп (кВт); h – время обработки муки (час); M – масса переработанной муки за время h (кг).

Вероятность ошибки наблюдаемой разницы живой массы животных оценивали по критерию Стьюдента стандартными методами [5]. Достоверным положительным результатом считалось увеличение скорости роста животных в сравнении с контролем при ошибке разницы не более 1% ($P < 0,01$).

Результаты

В I эксперименте (табл. 1) выявлена пропорциональная зависимость между степенью фотообработки муки (по интенсивности ФИ сигналов ЭПР в единицах “марганца”) и привесами животных вследствие увеличения питательности кормов. Лучшим режимом фотообработки кормовой муки, обеспечивающим достоверное увеличение ее питательности по привесам, оказался режим обработки для V группы, где интенсивность ФИ сигналов ЭПР имеет насыщение по величине (поглощенная световая энергия – 0,2 кВт·час/кг).

Таблица 1. Влияние фотообработки корма из кукурузной муки на привесы растущих белых крыс (количество животных – 10) линии Вистар

№ групп	Время обработки, мин	Относительная интенсивность ФИ сигналов ЭПР (в единицах “марганца”)	Средний привес за период вскармливания 30 дней одного животного		Уровень вероятности, P
			г	%	
I (к)	0	Γ^*	95	100	
II	8	2,3	103	108	$P < 0,40$
III	15	3,2	108	114	$P < 0,15$
IV	25	3,5	113	119	$P < 0,05$
V	30	3,6	121	127	$P < 0,01$

* Собственный (темновой) сигнал ЭПР муки.

Дополнительный привес составил 127% ($P < 0,01$).

II эксперимент. Установлено, что в условиях опыта лучшие результаты по привесам животных соответствовали группам, где поглощенная энергия составляла 0,16 кВт·час на кг муки (III и IV группы).

Разница в привесах по сравнению с контролем была достоверной ($P < 0,01$) (табл. 2).

Если поглощенная энергия превышала установленный оптимум в 1,5 раза (V группа), то эффект фотообработки по привесам отсутствовал.

Установленный положительный эффект в III и IV группах коррелирован с увеличением ФИ сигналов ЭПР муки. Мука кукурузы, скормленная II группе животных, имела слабый (недостовверный) ФИ сигнал ЭПР. Мука кукурузы V группы имела также слабый ФИ сигнал ЭПР, который в последующие дни хранения исчез.

Таблица 2. Эффективность фотообработки муки при различных уровнях поглощенной световой энергии

№ групп	Поглощенная энергия, кВт·час/кг	Производительность установки (кг муки в час)	Мощность ламп, кВт	Среднесуточный привес одного животного, г	Уровень вероятности, P
I (к)	–			3,8±0,16	
II	0,096	50	4,8	3,6±0,20	–
III	0,160	50	8,0	4,8±0,05	P<0,01
IV	0,160	30	4,8	4,6±0,19	P<0,01
V	0,267	30	8,0	3,4±0,30	–

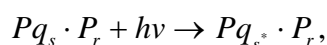
Время обработки 1 час.

Обсуждение

Для совершенствования технологии фотообработки растительного сырья и создания автоматизированных методов электронного контроля процессов обработки кормов принципиальным является выявление корреляции между степенью фотообработки муки (по интенсивности ФИ сигналов ЭПР) и ее питательностью. В наших опытах получило подтверждение положение о том, что лучшим режимом фотообработки является режим, при котором достигается насыщение ФИ сигналов ЭПР в объеме муки. Фотодинамическое действие оптического излучения состоит в необратимом разрушении (деструкции) биологических объектов, содержащих хромофорные группы в присутствии кислорода. Это действие, как правило, сопровождается проявлением триплетных возбуждений, радикалов и т.п., фиксируемых методом ЭПР. Мука кукурузы содержит множество пигментов, в том числе каротин, входящий в состав пигмент-белковых комплексов.

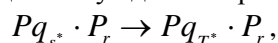
Под действием света, попадающего в полосу поглощения пигментов, фотодинамическое действие имеет различный результат в соответствии с энергией светового излучения, при нормальной величине поглощенной световой энергии (0,160 кВт·час/кг).

На первом этапе происходит оптический переход из основного синглетного состояния S пигмента в возбужденное синглетное состояние S*:



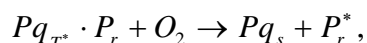
где $Pq_s \cdot P_r$ – пигмент-белковый комплекс с пигментом в основном синглетном состоянии; P_r – нативный белок этого комплекса.

Затем безызлучательный переход в возбужденное триплетное состояние T* пигмента:



где $Pq_{T^*} \cdot P_r$ – пигмент-белковый комплекс, пигмент находится в возбужденном триплетном состоянии.

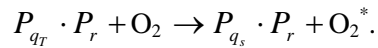
В этом состоянии пигмента он активно взаимодействует с молекулами кислорода O₂ (основное состояние – триплет):



то есть в результате такой реакции фотоокисления $Pq_{T^*} \cdot P_r$ происходит распад на пигмент в основном состоянии и перестроенный белок P_r^* . Перестроенный белок лучше переваривается животными, обменная энергия корма и привесы увеличиваются.

Фотодинамический процесс изменения числа неспаренных электронов в облучаемых во времени кормах описывается кривой с насыщением, близким к мультиэкспоненциальной. Предусматривается двойственный характер этого процесса, наряду с вышеописанным каналом имеется второй канал процесса.

При избытке поглощенной световой энергии она удаляется с образованием высокоэнергетической формы пигмента в триплетном состоянии, и далее с передачей избытка энергии на молекулярный кислород, переводя его в активное состояние (синглет) O₂*:



Пигмент переходит в основное состояние, комплекс $P_{q_s} \cdot P_r$ сохраняется, и, следовательно, его распад на пигмент и белок отсутствует. Тушителем синглетного кислорода служат свободные молекулы каротина [3, 4].

Таким образом, второй канал объясняет нелинейный характер процесса. Это, однако, не исключает, что на определенном участке мультэкспоненциальной кривой, при нормальной величине поглощенной световой энергии, процесс может быть аппроксимирован линейной функцией с минимальной ошибкой. Так, по результатам первого эксперимента (табл. 1) относительная величина количества животных, увеличивающих скорость роста под влиянием вскармливания фотообработанными кормами, связана с величиной ФИ сигналов ЭПР уравнением регрессии, где уровень вероятности не превышает 1% ($P < 0,01$). В то же время лучший результат по увеличению скорости роста (V группа) соответствует наибольшему насыщению ФИ сигналов ЭПР (3, 6 единиц).

Во втором эксперименте (табл. 2) проявляется влияние второго канала фотодинамического процесса, связанного с более высокой поглощенной световой энергией. Установлено, что при величине поглощенной энергии в 1,5 раза выше нормальной эффект увеличения питательности в результате фотообработки отсутствует, что объясняется сохранением пигмент-белковых комплексов муки в первоначальном виде.

Исследования показали, что изменение числа неспаренных электронов в облучаемых во времени кормах можно представить в виде кривой с насыщением, близким к мультиэкспоненциальной. Однако согласно эксперименту, в широком диапазоне времени облучения кормов между концентрацией парамагнитных центров, выраженных в виде ФИ сигналов ЭПР, и средним привесом, существующая зависимость может быть аппроксимирована линейной функцией

$$y' = ax + b,$$

где y' – относительное увеличение скорости роста; x – величина ФИ сигналов ЭПР (в относительных единицах); a и b – коэффициенты, зависящие от вида кормов и характеристики светового излучения, конструктивных особенностей установки.

При дальнейшем увеличении времени фотообработки кормов, начиная с некоторого момента ФИ сигналы ЭПР имеют тенденцию к насыщению по величине.

Установлено, что при достижении этого значения использование фотообработки кормов становится наиболее эффективным. Поэтому указанное значение ФИ сигнала ЭПР берется в качестве заданного для системы регулирования установок ФОК. Выбор оптимального варианта X_{\max} проверяется по результатам опытов кормления животных с целью выявления достоверного увеличения питательности. Эффективное время, необходимое для увеличения питательности муки, зависит от его соотношения с мощностью ламп. При выборе оптимальной энергии светового излучения ($E_{\text{крит.}}$) момент насыщения корма долгоживущими парамагнитными центрами ($X_{\text{макс.}}$) соответствует оптимальной питательности корма.

Установлено, что значительное превышение $E_{\text{крит.}}$ (в 1,5–2 раза) препятствует эффекту увеличения питательности кормов при фотообработке. Долгоживущие ФИ сигналы ЭПР в фотообработанной муке сохраняются до месяца (при нормальных условиях хранения).

В заключение авторы выражают благодарность Е.Ю. Канаровскому за критические замечания и ценное обсуждение результатов исследований.

Выводы

1. Насыщение ФИ сигналов ЭПР муки является условием, контролирующим эффективную фотообработку и является техническим критерием оптимизации процесса фотообработки.

2. Эффективное время фотообработки, необходимое для увеличения питательности муки, зависит от его соотношения с мощностью ламп. При выборе энергии светового излучения следует учитывать критический уровень поглощенной энергии. Например, для кукурузной муки (установка ФОК-3) $E_{\text{крит.}} = 0,16$ кВт·час на 1 кг корма. Превышение $E_{\text{крит.}}$ в 1,5 раза препятствовало эффекту фотообработки.

3. Предложена модель накопительного эффекта при фотообработке кормов. Момент насыщения долгоживущих парамагнитных центров (по ФИ сигналам ЭПР) соответствует критической величине поглощенной световой энергии. Модель адекватна результатам экспериментов по увеличению питательности в опытах кормления растущих животных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коварский Вал. А., Коварский Виктор А., Филипп Б.С. Фотохимические электронные процессы при обработке растительных материалов // Электронная обработка материалов. 1995. № 5–6. С. 89–92.
2. Коварский Вал. А., Коварский Виктор А., Филипп Б.С. Фотодинамическая модель повышения обменной энергии в кормах растительного происхождения // Электронная обработка материалов. 1999. № 4 (англ.). С. 65–72.
3. Гудвин Т., Мерсер Э. Введение в биохимию растений. Т. I. М., 1986. С. 122–135.
4. Бриттон Г. Биохимия природных пигментов / Пер. с англ. М., 1986. С. 337–339.
5. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). М., 1973.

Поступила 30.11.2000

Summary

It is demonstrated, that under the fodder photo-treatment the saturation of photo-induced signals of the electronic paramagnet resonance is a condition of meal nutritiousness arising for growing animals. The moment of saturation corresponds the critical volume of pumped light energy. The results of the experiments on feeding of growing white rats with photo-treated fodder are described.

С.А. Бурцева, В.А. Рева, *Г.С. Артыкова, *С.Д. Тофилат, *И.О. Растимешина

ЖАСМОНАТ-ИНДУЦИРУЕМЫЙ СИНТЕЗ БЕЛКА DE NOVO У STREPTOMYCES CANOSUS 71 VAR.6, ПОЛУЧЕННОГО ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ γ -ОБЛУЧЕНИЯ

*Институт микробиологии АН Молдовы,
ул. Академическая, 1, Кишинев, MD–2028, Республика Молдова
*Молдавский Государственный Университет,
ул. А. Матеевича, 60, Кишинев, MD–2009, Республика Молдова*

Известно, что ультрафиолетовые (УФ) и ионизирующие излучения вызывают различные нарушения в ДНК, РНК, приводят к подавлению их синтеза, образованию сшивок ДНК – белок, дегградации ДНК и других [1]. Так, установлено, что при действии высоких доз γ -лучей на *E. coli*, прежде всего, наблюдается изменение хода синтеза ДНК, а затем угнетение других клеточных синтетических систем. Изменения развиваются в следующей последовательности: ДНК – РНК – рибосома – белок – липиды [2]. Во многих работах показано изменение липидного компонента мембран под действием ионизирующей радиации. Можно отметить, что в корпоративной системе белок-липидного матрикса мембран изменение липидного компонента приводит к изменению структурно-функциональных свойств интегральных белков мембран [3, 4]. Учитывая вышесказанное, представляет интерес поиск среди химических агентов или природных соединений веществ, воздействующих на ДНК и способствующих выявлению генетической роли отдельных компонентов бактериальной клетки и выяснению механизма бактериального мутагенеза.

Исследование соединений, обладающих гормональной активностью, и их влияния на живые организмы является новой и бурно развивающейся отраслью современной биологии. Число открытых биологически активных соединений постоянно увеличивается. Особый интерес представляют окисленные производные ненасыщенных жирных кислот – оксилипины, которые играют определяющую роль в стратегии стрессовых состояний организмов [5]. Непосредственными предшествен-

© Бурцева С.А., Рева В.А., Артыкова Г.С., Тофилат С.Д., Растимешина И.О., Электронная обработка материалов, 2001, № 3, 47–54.

никами оксипиринов являются ненасыщенные жирные кислоты мембранных фосфолипидов. Одним из таких соединений является жасмоновая кислота и ее метиловый эфир или жасмонаты (*J*) [6]. Их регуляторная роль в растительном мире теперь уже не вызывает сомнения. Однако последние исследования показали, что *J* распространены не только в мире растений, они встречаются в водорослях и мицелиальных грибах и являются компонентами женских половых аттрактантов мотыльков. Уровень эндогенных *J* быстро и кратковременно увеличивается в результате механических пертурбаций, изменения тургора, вследствие водного дефицита, поранения и других воздействий физико-химических факторов [7]. Кроме того, накопление *J* можно индуцировать такими элиситорами, как хитозан клеточной стенки грибов и различными пептидами [8, 9].

Все известные реакции растений на *J*, независимо от того, введены они извне или образуются эндогенно, и вызывающие изменения в экспрессии генов, можно условно разделить на три группы: 1) индукция новых белков – ЖР (жасмонат-индуцированные белки); 2) избирательная репрессия синтеза конститутивных белков; 3) временное замедление синтеза в целом, имеющее место в результате длительного воздействия *J* или стресса [10].

Многие экспрессированные ЖР обладают видовой и родовой специфичностью [11]. Кроме того, имеются качественные и количественные различия в отношении репрессии синтеза конституционных белков. Все эти данные свидетельствуют о том, что растения различаются по способности воспринимать и метаболизировать *J*. Семейство ЖР высших растений можно разделить на пять групп: 1) ингибиторы протеиназ; 2) тионины; 3) белки, богатые пролином и оксипролином; 4) ферменты фенилпропаноидного метаболизма; 5) рибосомы-инактивирующие белки [12].

Для изучения регуляции различных типов биохимических процессов, протекающих в клетке, микроорганизмы представляют собой очень благодатный объект в силу их исключительного разнообразия, быстроты протекания реакций, возможности работать с большим количеством однородного материала, относительно легким получением и поддержанием разнообразных мутантов и по ряду других причин [13]. В то же время высокая биологическая активность микробных ауторегуляторов и связанное с этим их малое содержание в клетке, их быстрое исчезновение в процессе метаболизма и вызываемые этими причинами трудности их выделения и очистки, а также многообразие процессов, на которые иногда влияет один и тот же регулятор, – все это нередко ставит сложные проблемы.

Среди микроорганизмов одной из наиболее продуктивных групп в отношении образования биологически активных веществ являются актиномицеты [14, 15]. Согласно литературным данным, характерной чертой стрептомицетов является высокая генетическая нестабильность многих признаков: способность образовывать воздушный мицелий, пигментация, продукция антибиотиков, ферментов, липидов, регуляторов роста и пр. Во многих случаях наблюдается одновременное изменение нескольких признаков [16–19].

Целью исследования было изучение влияния метилжасмоната, рассматриваемого в последних литературных источниках как новый класс фитогормонов, на такую группу микроорганизмов, как актиномицеты, которые интересны не только своим таксономическим положением, но и являются уникальными по своему биосинтетическому потенциалу.

Материалы и методы исследований

Объектом исследований служил устойчивый вариант музейного штамма стрептомицетов *Streptomyces canosus* 71 var. 6, полученный под воздействием ионизирующего излучения и характеризующийся большей удельной скоростью роста и повышенным содержанием липидов, в частности фосфолипидов [20]. Главным же критерием в выборе объекта исследования стала идентификация методом газо-жидкостной хроматографии у данного варианта линоленовой кислоты, которая не характерна для исходной культуры, так как именно линоленовая кислота является непосредственным источником эндогенных жасмонатов [21].

Влияние фитогормона метилжасмоната (МЖ) на морфологию актиномицета изучали путем посева суспензии спор на твердую агаризованную среду Чапека. Для получения изолированных колоний делали пять десятикратных разведений исходной суспензии спор. Чашки инкубировали в термостате при 28°C.

Влияние МЖ на культуральные свойства актиномицета изучали путем внесения спиртового раствора фитогормона в среду культивирования. Фитогормон вносили в конце экспоненциальной фазы роста, время экспозиции составляло 24 ч.

Экстракцию белков из биомассы осуществляли гомогенизацией с битым стеклом в буфере следующего состава: 0.1М Трис-НСl рН 8.0; 5% глицерин; 0.1% ЭДТА; 1% МЕ.

Количественное определение белка проводили по методу Брэдфорда [22].

Изучение белковых фракций осуществляли методом электрофореза в полиакриламидном геле в денатурирующих условиях с использованием трициновой системы [23].

Фракцию дегидрогеназ выделяли псевдоаффинной хроматографией на иммобилизованном красителе цибакрон голубой F3GA с использованием техники сорбции в объеме. Иммобилизацию красителя проводили на сефарозе CL-4B согласно инструкции фирмы производителя. Неспецифически связавшиеся белки удаляли промыванием 200-кратным объемом воды. Элюцию белков с матрицы проводили неспецифически импульсно 1М NaCl.

Результаты исследований и их обсуждение

Была проведена серия опытов, целью которых было получение устойчивых вариантов стрептомицетов с повышенной липогенной активностью под воздействием ионизирующего излучения. Объектом исследований служил музейный штамм стрептомицетов *S. canosus 71*, водную суспензию спор которого облучали на радиационно-химической установке РХМ-γ-20 с активностью 12750 Кюри и мощностью 0.67Гр/сек. Источником γ-лучей являлся радиоактивный Co^{60} .

Из проанализированных 1200 колоний, полученных после микробиологического посева облученной суспензии спор и характеризовавшихся измененной окраской гифов и постоянством морфологических признаков, после многократного пассирования были отобраны 4 варианта, которые уже на 2–3 сутки роста на агаризованной среде Чапека образовывали густой газон. После изучения способности накапливать биомассу и образовывать липиды при росте на комплексной среде М-1 (основной источник углерода – кукурузная мука) на момент отбора и спустя различные промежутки времени, особое внимание привлек *var. б*, у которого методом газо-жидкостной хроматографии была идентифицирована линоленовая кислота, не обнаруженная у исходной культуры. Этот факт стал определяющим в выборе объекта для дальнейших исследований, так как именно линоленовая кислота является непосредственным предшественником эндогенных *J*.

Было установлено, что на момент выделения *var. б* превосходил исходный штамм на 124,0% по количеству биомассы и на 98,4% по количеству липидов. Через 6 месяцев после отбора при культивировании на органической среде М-1 *var. б* накапливал меньше биомассы, в которой липидов было больше, чем на момент отбора (171,4% общих липидов по сравнению с контролем).

Результаты изучения культурально-морфологических особенностей *var. б* в сравнении с исходной культурой представлены в таблице.

Культурально-морфологические свойства штамма S. canosus 71 и его варианта S. canosus 71 var. б, полученного под воздействием γ-излучения

Культурально-морфологические свойства	Исследуемая культура	
	<i>S. canosus 71</i>	<i>S. canosus 71 var. б</i>
Диаметр колоний, мм	4,0 – 5,0	10,0 – 12,0
Форма колоний	Круглые, в центре аспорогенный кратер	Круглые, в центре аспорогенный кратер
Цвет воздушного мицелия	Белый	Голубовато-серый
Цвет культуральной жидкости	Абрикосово-желтый	Инкарнатно-розовый
Цвет биомассы	Темно-песочный	Изабелловый

При изучении фракционного состава общих липидов, экстрагированных из биомассы *S. canosus 71* и *S. canosus 71 var. б* методом тонкослойной хроматографии было идентифицировано 6 фракций. Культивирование исходного штамма на сложной комплексной среде М-1 способствовало тому, что в количественном отношении преобладающими были триглицериды, суммарная фракция эфиров стеринов и восков, а также стерины. Далее, по степени уменьшения процентного содержания в общих липидах идет фракция моно- и диглицеридов и фосфолипидов. Процесс липидообразования является весьма условным, так как всецело зависит от среды культивирования, а преобладание тех или иных фракций в составе общих липидов варьирует, как правило, в зависимости от качественного состава среды.

Наибольшие количественные отличия между культурами были отмечены для фракций фосфолипидов и стерина, причем эти отличия проявлялись как на момент отбора, так и спустя 6 и 12 месяцев после отбора. Так, вариант превосходил исходную культуру на 11,3% по количеству фосфолипидов и на 13,0% – стерина. По содержанию триглицеридной фракции *var. 6* превосходил *S. canosus 71* незначительно, а по количеству ди- и триглицеридов *var. 6* несколько уступал исходной культуре.

В ходе изучения липидных фракций культур с различными интервалами времени от момента отбора наблюдались количественные колебания в содержании, как общих липидов, так и отдельных фракций у исходного штамма и варианта *S. canosus 71 var. 6*. Причиной подобных осцилляций, вероятно, является зависимость метаболической активности актиномицетов от сезонного периодизма.

Наблюдения о влиянии МЖ на морфологию *S. canosus 71 var. 6*, производили, начиная с 5-го дня от момента посева. При этом были отмечены существенные отличия в росте культуры, обусловленные МЖ. Наблюдаемые отличия касались размеров колоний и их характера (см. рис. 1).

Так, в ряду увеличивающихся концентраций МЖ наблюдалась явная тенденция подавления роста колоний, сопровождающаяся изменениями их морфологии и даже появлением разнотипных колоний, в случае высокой концентрации МЖ.

При количестве МЖ 2γ на чашку каких-либо видимых морфологических отличий относительно контроля не наблюдали. Колонии белого цвета, плоские, диаметром 0,8–1,0 см, в форме снежинок, с широким кратером в центре, как и в случае контроля. По-видимому, такое количество МЖ приближается к возможному физиологическому или же является ниже уровня порогового. В случае, когда на чашку наносили 20γ МЖ (количество на порядок выше того, при котором не наблюдаются какие-либо видимые изменения морфологии), было отмечено значительное уменьшение размеров колоний до 0,2–0,4 см в диаметре. Изменения затронули и тип колоний. Цвет колоний приобрел сероватый оттенок, кратер отсутствует, центр выпуклый. При нанесении 40γ МЖ на поверхность агара прослеживалось все более явное ингибирование роста. Весьма интересным явился факт расщепления культуры, следствием чего было появление двух типов колоний: 1-й тип диаметром 0,2–0,3 см, серые в центре, белые по краям с небольшим кратером и 2-й тип – карликовые 0,1–0,15 см в диаметре, белые.

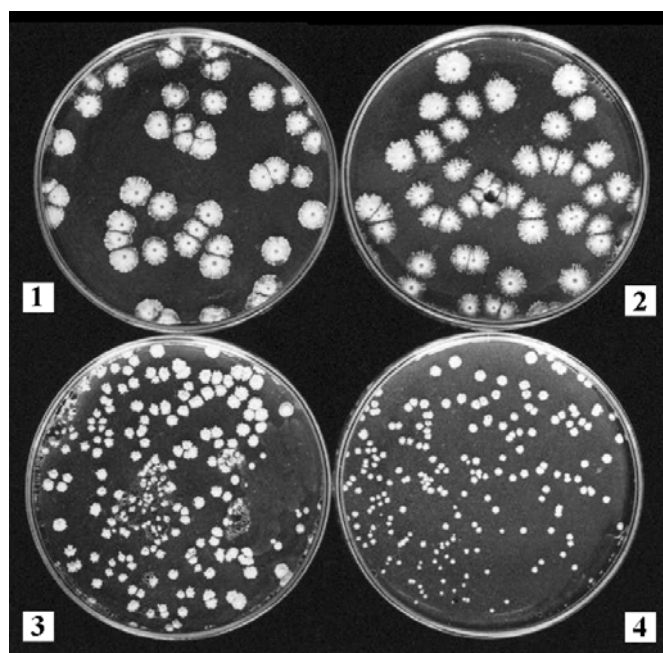


Рис. 1. Влияние метилжасмоната (МЖ) на морфологию *Streptomyces canosus 71 var. 6*.
1 – контроль; 2 – 20 γМЖ; 3 – 200 γМЖ; 4 – 400 γМЖ.

Наблюдения за культурой актиномицетов, подвергнутых влиянию разных концентраций МЖ, проведенные в динамике, начиная с 5-го дня культивирования по 14-й, позволяют утверждать, что культура *S. canosus 71 var. 6* является чувствительной к фитогормону МЖ, который в относительно больших количествах оказывает эффект ингибирования роста. Какие механизмы при этом используются, трудно даже предположить, так как эффекты МЖ на некоторые физиологические параметры у растений настолько разнотипны, что вывести какую-то генеральную схему действия МЖ практически

невозможно. Так, известно, что МЖ стимулирует прорастание покоящихся семян и, наоборот, подавляет прорастание семян, вышедших из покоя [24]. В опытах на бобовых нами было отмечено, что высокие концентрации МЖ стимулируют рост главного корня и при этом подавляют развитие придаточных корней.

В связи с тем, что актиномицеты при глубинном культивировании выделяют в среду большое количество экзометаболитов, среди которых значительную часть составляют экзоферменты, был изучен белковый состав культуральной жидкости (КЖ).

Установлено, что при экзогенном введении МЖ в культуру актиномицета имеют место качественные и количественные изменения белкового состава КЖ. Так, количественное определение белка показало наличие определенной зависимости между содержанием белка и дозой фитогормона в интервале 1–50 мкМ (рис. 1). В интервале концентраций от 1 до 5 мкМ было отмечено некоторое увеличение содержания белка относительно контроля. При концентрациях МЖ 25–50 мкМ наблюдалась обратная зависимость, т.е. содержание белка снижалось по сравнению с тем, которое отмечалось под действием низких концентраций и незначительно уменьшалось по сравнению с контролем. Таким образом, кривая зависимости доза-эффект носит сложный характер и может быть результатом явления насыщения рецептора гормоном.

Анализ белков культуральной жидкости *S. canosus 71 var.6*, культивируемого на среде Чапека, методом ЭФ в ПААГ-ДСН-трицин показал наличие 26 зон, что говорит о высокой экстрацеллюлярной энзиматической активности. При сравнении белковых треков, соответствующих контрольной и опытным пробам, было отмечено качественное отличие. В культуре стрептомицета под действием экзогенно введенного МЖ обнаружен белок с Mr 50кДа, отсутствующий в контроле.

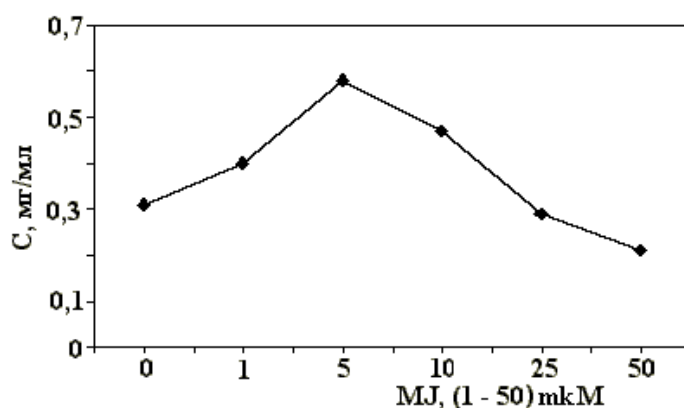


Рис. 2. Кривая зависимости содержания белка в культуральной жидкости *Streptomyces canosus 71 var. 6* от концентрации МЖ, внесенного в среду культивирования. По оси абсцисс – концентрация МЖ, по оси ординат – концентрация белка.

На основании данных об изменениях белкового состава (КЖ) под действием МЖ логично было предположить, что появление белка на внеклеточном уровне есть вторичное явление и что первичные изменения необходимо искать на внутриклеточном уровне. В связи с этим изучению была подвергнута водорастворимая фракция белка биомассы, при этом в силу полидисперсности последней были использованы дополнительные методы фракционирования, в основе которых лежит сродство к определенным лигандам. В качестве такого лиганда была использована голубая сефароза.

Использование подобного адсорбента позволяет сконцентрировать исследование на двух группах объектов: 1) белках, связывающих пуриновые нуклеотиды (условно дегидрогеназах), то есть белках, элюированных с колонки (положительная фракция) и 2) белков, условно не отнесенных к дегидрогеназам, поскольку они не обладают сродством к аффинному гелю и поэтому остаются в растворе (отрицательная фракция).

При сравнительном анализе белкового профиля положительной фракции, соответствующей контрольной и опытной пробам, методом ЭФ в ПААГ с последующей импрегнацией белков серебром, были установлены качественные и количественные изменения. Денситометрический анализ электрофоретических зон показал наличие 7 основных пиков, выявленных и в контрольной, и в опытной пробам (рис. 3). Площади пиков при этом существенно различаются, что может быть мерой количественной оценки отдельных ферментов в положительной фракции.

Качественные изменения были выявлены на уровне минорных пиков. Так, под действием MJ в контроле было отмечено исчезновение одного пика и количественное уменьшение двух других минорных пиков на фоне уширения основных пиков.

По-видимому, роль ферментов, соответствующих основным пикам, настолько велика, что изменения в их составе следует ожидать при весьма жестких условиях воздействия факторов окружающей среды, приводящих к серьезным нарушениям гомеостаза. В данном же случае это воздействие (обработка фитогормоном) не является столь действенным.

Фракция, элюированная с колонки, условно не содержащая дегидрогеназы, была подвергнута тепловой денатурации при 60°C, после чего была изучена методом ЭФ в ПААГ в системе трицин-ДСН. При этом картина белкового профиля заметно прояснилась. В опытной пробе (обработка MJ) была выявлена зона, отсутствующая в контроле, с Mr ~65кДа. Поскольку контрольная и опытная пробы изучались в идентичных условиях, то появление новой зоны (белка) может быть объяснено изменением в экспрессии генов у актиномицета, индуцированным MJ.

На основании данных о Mr белок, образованный *de novo*, можно отнести к классу JIP 60. JIP 60 представляет собой новый класс рибосомы-инактивирующих белков (RIP) [25]. Благодаря своему лектиновому домену JIP 60 может связываться с гликопротеинами клеточной стенки патогенов и по аналогии с RIP проникать путем эндоцитоза внутрь клетки и атаковать рибосомы, подавляя тем самым биосинтез белка. JIP 60 обладает сигнальной последовательностью, характерной для белков, предназначенных для “экспорта”. Однако как происходит его секреция еще до конца не ясно. Так, например, гомолог JIP 60 из арабидопсиса первоначально накапливается в виде 67кДа предшественника, затем, претерпевая сплайсинг, в ходе которого лишается сигнальной последовательности, транспортируется по эндоплазматическому ретикулуму клетки [26]. Предполагается, что обнаруженный экстрацеллюлярный (в культуральной жидкости) белок *de novo* с Mr 50кДа есть результат сплайсинга своего предшественника с Mr 65кДа, обнаруженного на клеточном уровне (водорастворимая фракция биомассы).

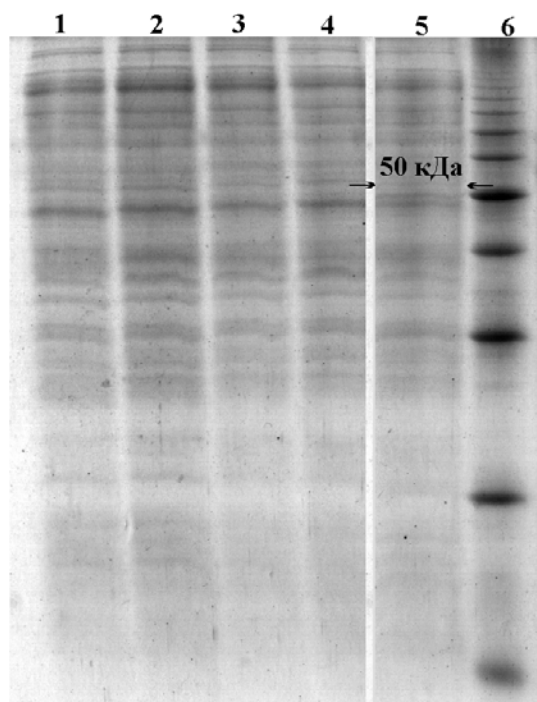


Рис. 3. Электрофореграмма белков культуральной жидкости *Streptomyces canosus* 71 var. 6 под действием MJ. 1 – контроль; 2–5 – от 5 до 50 мкМ MJ; 6 – маркеры.

Вопрос о том, действует JIP 60 первично внутриклеточно, инактивируя собственные рибосомы в пораженных клетках, или внеклеточно, направляя свое действие непосредственно на рибосомы патогенов, остается открытым. Еще большую неясность в этот вопрос вносит факт MJ-индуцированного синтеза белка у актиномицетов, возможно, относящегося к классу JIP 60. Актиномицеты, будучи организмами, занимающими на эволюционной лестнице промежуточное положение между бактериями и грибами, также могут быть рассмотрены как патогены.

Таким образом, наблюдаемое угнетение роста, обусловленное MJ, а также морфологические изменения, затрагивающие тип колоний актиномицетов, позволяют объяснить все эти явления, прежде всего за счет образования RIP. С другой стороны, если рассматривать актиномицеты как потенциальные патогены растений, то индуцированное в них MJ образование RIP решает вопрос о первичности действия этого белка в пораженных тканях, т. е. MJ может индуцировать RIP в клетках патогенов и тем самым препятствовать их развитию и дальнейшему распространению.

Выводы

1. Изучено действие фитогормона MJ на рост колоний *Streptomyces canosus* 71 var.6, полученного под действием γ -облучения. Установлено изменение морфологии (форма, размер, цвет) в зависимости от концентрации MJ.

2. Показано, что экзогенно введенный MJ в культуру *Streptomyces canosus* 71 var.6 индуцирует синтез белка *de novo* с Mг 65кДа, который, претерпевая внутриклеточный сплайсинг, транспортируется в культуральную жидкость в виде 50кДа-нового белка.

3. Установлены количественные изменения содержания белка культуральной жидкости в зависимости от концентрации MJ, внесенного в среду культивирования актиномицета: при низких концентрациях MJ отмечается увеличение содержания общего белка, а при концентрации MJ, индуцирующей синтез белка *de novo*, количество белка уменьшается.

4. Определены качественные и количественные изменения фракции дегидрогеназ под действием MJ, которые проявляются при денситометрическом анализе в исчезновении одного минорного пика и количественного уменьшения двух других пиков на фоне уширения основных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воробьева Л.И., Никитенко Г.В., Ходжаев Е.Ю., Пономарева Г.М. Реактивация инактивированных ультрафиолетовым светом *Escherichia coli* клеточными экстрактами пропионово-кислых бактерий // Микробиология. 1993. Т. 62. Вып. 6. С. 1135–1143.
2. Скавронская А.Г. Мутации у бактерий. М., 1967. С. 120–130.
3. Коломийцева И.К. Радиационная биохимия мембранных липидов. М., 1989.
4. Древаль В.И. Влияние ионизирующего излучения на активность Ca^{2+} , Mg^{2+} -АТФазы плазматических мембран // Радиобиология. 1992. Т. 32. Вып. 2. С. 222–224.
5. Blee E. Principal metabolism of plant and animal oxylipins // Abstr. Internation. Meet. "Similarities and differences of redox control signal transfer and stress response in plant, human and animal". Halle, 1998.
6. Creelman R., Mullet J. Jasmonic acid distribution and action in plants // Regulation during development and response to biotic and abiotic stress. 1995.
7. Creelman R., Mullet J. Biosynthesis and action of jasmonates in plants // Annu. Rev. Plant Mol. Biol. 1997. № 48. P. 355–381.
8. Gundlach H., Muller M., Kutchan T., Zenk M. Jasmonic acid is a signal transducer in elicitor-induced plant cell cultures // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 1992. № 89. P. 2389–2393.
9. Pearce G., Strydom D., Johnson S., Ryan C. A polypeptide from tomato leaves induces wound-inducible proteinase inhibitor proteins // Science. 1991. № 253. P. 895–898.
10. Reinbothe B., Mollenhauer B., Reinbothe C. JIPs and RIPs: the regulation of plant gene expression by jasmonates in response to treatmental cues and pathogens // The Plant Cell. 1994. № 6. P. 1197–1209.
11. Мюллер-Ури Ф., Партье Б., Манди Д. Чувствительная к жасминовой кислоте экспрессия генов у ячменя // Физиология растений. 1997. № 41. С. 696–698.
12. Красильников А.С. Лучистые грибки. М., 1970. С. 245–263.
13. Безбородов А.М. Метаболиты внутриклеточного фонда микроорганизмов. М., 1974.
14. Безбородов А.М. Ферменты микроорганизмов. М., 1984.
15. Бурцева С.А. Микробные биоантиоксиданты липидной природы: Автореф. дисс. канд. биол. наук. М., 1986.
16. Алиханян С.И., Акифьев А.П. Общая генетика. М., 1985. С. 41–48.
17. Даниленко В.М., Родионова И.И. Механизмы липогенной нестабильности стрептомицетов // Антибиотики и химиотерапия. 1989. Т. 33. № 3. С. 164–171.
18. Заворотная С.А., Федоренко В.А., Даниленко В.М. Генетическая нестабильность признака стрептомицинустойчивости у *Streptomyces erytraeus* // Антибиотики и химиотерапия. 1990. Т. 35. № 12. С. 18–21.

19. Veselinova M., Gesheva R. A polymorphism of *Streptomyces spectabilis* 1000 // Докл. Болг. АН. 1989. Т. 42. № 5. С. 97–100.
20. Бурцева С.А. Влияние γ -излучения на рост и липидообразование *Streptomyces canosus* 71 // Электронная обработка материалов. 2000. № 2. С. 68–73.
21. Chandra S., Heinstejn P., Low P. Activation of a phospholipase A by plant defence elicitors // Plant Physiol. 1996. № 110. P. 979–986.
22. Bradford M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding // Analit. Biochem. 1976. V.72. P. 248–254.
23. Schagger H, von Jagow G. Tricine-sodium dodecyl sulfate – polyacrylamide gel electrophoresis for the separation of protein in the range from 1 to 100 kDa // Analyt. Biochem. 1987. V. 166. P. 368–379.
24. Bewley J. Seed germination and dormancy // Plant Cell. 1997. V. 9. P. 1055–1066.
25. Chauhry B., Mulleer-Uri F., Cameron-Mills V., Gough S., Simpson D., Skriver K., Mundy J. The barley 60 kDa jasmonate-induced protein (JIP 60) is a novel ribosome-inactivating protein // Plant J. 1994. V. 6. P. 815–824.
26. Bednarek S., Raikhel N. Intracellular trafficking of secretory proteins // Plant Mol. Biol. 1992. V. 2. P. 133–150.

Поступила 16.02.2001

Summary

The phytohormone methyljasmonate (MJ) on exogenously introducing into the culture of *Streptomyces canosus* 71 var. 6, obtained after γ -irradiation, induced synthesis the protein *de novo* with the molecular weight of 50 Kda. The action of MJ provokes a gene (genes) expression that resulted in a 65 kDa protein synthesis. This new precursor after intracellular splicing was exported into the culture medium as 50kDa protein. Morphologically the MJ action was discovered in the colonies' growth inhibition. Based on these dates, protein synthesizing *de novo*, may be classified as a new member of class of the ribosome-inactivated proteins.

А.М. Даниленко, М.П. Купчик, И.С. Гулий

ОБОСНОВАНИЕ РЕЖИМА ВОЗДЕЙСТВИЯ СВЧ-ПОЛЯ НА РАСТИТЕЛЬНУЮ ТКАНЬ

*Украинский государственный университет пищевых технологий,
ул. Владимирская, 68, Киев-33, 01033, Украина*

Механизм типичного процесса денатурации растительной клетки заключается в нарастающем по времени тепловом воздействии на белок мембран вакуоли. Это приводит к увеличению содержания в мембранах высокомолекулярных растворимых белков и, в конечном счете, к частичному разрушению мембран. Таким образом, тепловой процесс денатурации носит биохимический характер [1–4]. Однако денатурация растительной клетки может быть достигнута и за счет физического воздействия внутриклеточной жидкости растительной ткани на мембранные перегородки. Такое воздействие обусловлено различными диэлектрическими свойствами жидкости и веществ белково-пектинового комплекса. Так, в диапазоне частот $3 \cdot (10^8 - 10^9)$ Гц величина диэлектрических потерь $\varepsilon'' = \varepsilon' \cdot \operatorname{tg} \delta$ во внутриклеточной жидкости превышает потери в сухих веществах растительной клетки в ~80 раз. Это означает, что коэффициент теплового расширения этих сред также отличается примерно на порядок. На основе этого эффекта возможно механическое разрушение мембран

© Даниленко А.М., Купчик М.П., Гулий И.С., Электронная обработка материалов, 2001, № 3, 54–59.

вакуоли за счет увеличения внутриклеточного давления под действием объемного теплового расширения жидкости. Для того, чтобы создать градиент температур между клеточной жидкостью и окружающими вакуоль тканями необходимо обеспечить такую скорость нагрева, чтобы исключить конвективное выравнивание температуры по всему объему.

Определенная скорость нагрева может быть обеспечена увеличением удельной мощности, подводимой к продукту. Поскольку в технологическом процессе производства сахара продолжительность той или иной технологической операции строго увязана между собой, увеличение скорости нагрева не может быть достигнуто за счет наращивания суммарной выходной мощности источников СВЧ-излучения. Скорость нагрева может быть обеспечена путем подачи мощности в малый объем продукта. Такой режим обработки можно рассматривать как псевдоимпульсный, а именно: аналогично импульсному режиму генерации мощности к малому объему стружки на короткий период времени подводится большая мощность.

Соотношение между величиной подающей СВЧ-мощности и массой свекловичной стружки определяется требуемой скоростью нагрева, которая лежит в пределах 1,3–1,9°С/с. Выбор конструкции камеры для СВЧ-нагрева свекловичной стружки определяется среди прочих условий значением коэффициента полезного действия η [7]:

$$\eta = \frac{P_{\Sigma}}{P_{ex}} = \frac{P_{\Sigma}}{P_{\Sigma} + P_{nom} + P_{omp}}, \quad (1)$$

где P_{ex} – полная входная мощность; P_{Σ} – полезная мощность, рассеиваемая в диэлектрике; P_{nom} – мощность омических потерь в металле стенок камеры и диэлектрическом транспортировочном канале; P_{omp} – мощность, отраженная в плоскости падения входящей мощности из-за неидеальности согласования антенны, возбуждающей резонатор.

В исследованной нами ранее [5] структуре подачи мощности в слой диэлектрика через систему встречных полосковых Y – разветвлений [6, 7] коэффициент согласования между выходом генератора и коаксиально-полосковым переходом в диапазоне $f=915$ МГц с разбросом в 15% не превышал 1,15–1,2. Отсюда следует, что коэффициент полезного действия в полосковой структуре зависит в основном от величины омических потерь в металле стенок камеры и диэлектрике транспортировочного канала. Поэтому задача нагрева стружки с определенной скоростью сводится к созданию камеры нагрева с минимальным объемом, близким к объему самого продукта, с одной стороны, и с максимальным КПД – с другой стороны.

Уменьшение объема камеры ограничивается следующими требованиями:

- минимально допустимое расстояние между бесконечными металлическими проводниками, при которых отсутствует диэлектрический пробой;
- равномерное распределение электромагнитного поля в объеме диэлектрика.

На рис. 1 приведено поперечное сечение экранированных связанных полосковых линий в виде двух полосок, расположенных одна над другой.

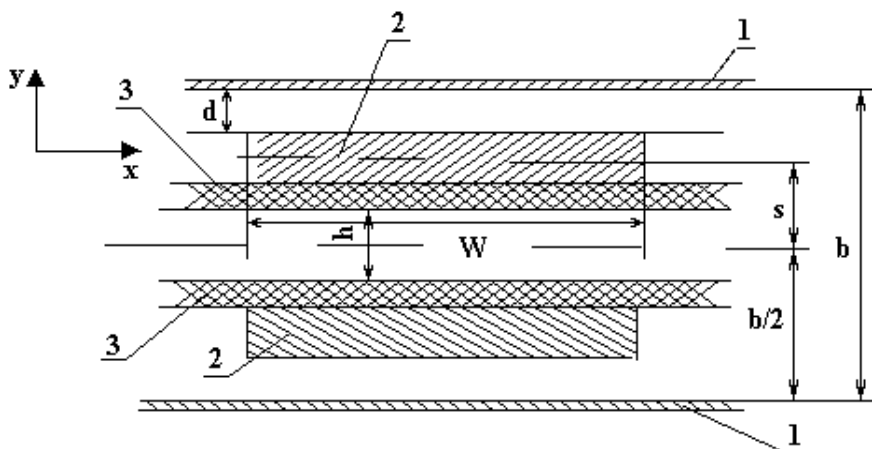


Рис. 1. Схема экранированных связанных полосковых линий:

1 – экранирующий кожух; 2 – полоски; 3 – диэлектрический транспортировочный канал.

Максимальная мощность, которая может быть передана по полосковой линии, определяется наибольшей допустимой напряженностью E_{max} для данного диэлектрического заполнения. Связь между E_{max} и разностью потенциалов между полоской и соответствующей экранирующей плоскостью определяется следующим соотношением [8, 9]:

$$E_{max} = \frac{8}{\pi} \cdot \frac{U}{b}, \quad (2)$$

где U – разность потенциалов; b – расстояние между плоскостями, откуда $U_{max} = \frac{E_{max} \pi b}{8}$ и соответственно максимальная мощность, которая может быть передана по полосковой линии, выразится как

$$P_{max} = \frac{0,077 E_{max}^2 b^2}{Z_0} \text{ Вт}, \quad (3)$$

где Z_0 – волновое сопротивление линии.

Числовые расчеты показывают, что между полосками и экранирующими плоскостями при зазоре $d=5$ мм, волновом сопротивлении линии 50 Ом и $E_{max}=3$ кВ/мм в 30-сантиметровом диапазоне возможность пробоя возникает при передаче мощности более $P_{пробоя} = 34,6$ МВт. При расчете во внимание принималось явление краевого эффекта, возникающего на гранях полоски. Если грани полоски скруглить и тем самым свести влияние краевого эффекта к минимуму, то P пробоя увеличится в $\pi/4$ раз.

Равномерность нагрева свекловичной стружки в структуре, приведенной на рис. 1, обеспечивается встречно-симметричным направлением распространения электромагнитной волны в слое диэлектрика. Направление распространения СВЧ-мощности показано на рис. 2.

В приведенной на рис. 2 структуре коаксиально-полосковый переход можно рассматривать как антенну поверхностной волны. Электромагнитная волна распространяется от источника СВЧ-мощности вдоль оси X , при этом напряженность электромагнитного поля линейно убывает. Равномерность нагрева свекловичной стружки вдоль оси X достигается наложением двух распространяющихся во встречном направлении электромагнитных волн. Равномерность нагрева стружки вдоль оси Y обеспечивается наложением проникающих на глубину $V = \frac{\lambda_0}{2\pi \sqrt{\epsilon \mu \tan \delta}}$ электромагнитных волн. Расстояние между полосками определяется из условия $b \approx 2,5-3 V$.

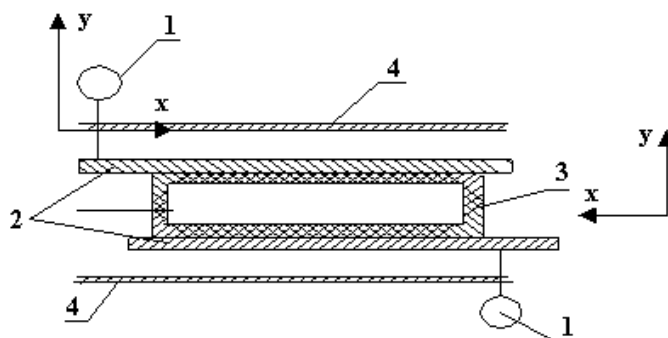


Рис. 2. Схема распространения СВЧ-мощности:

1 – генераторы СВЧ-мощности; 2 – коаксиально-полосковые переходы; 3 – диэлектрический транспортный канал; 4 – экранирующий кожух.

Поперечный размер полоски (рис. 3) определяется путем расчета волнового сопротивления экранированной полосковой линии [9].

Волновое сопротивление полосковой линии Z_0 можно определить через ее емкость на единицу длины, Ом [7]:

$$Z_0 = \frac{\sqrt{\mu \cdot \epsilon}}{3C} \cdot 10^4, \quad (5)$$

где μ и ε – относительные диэлектрическая и магнитная проницаемость среды между металлическими проводниками; C – погонная емкость линии, пФ/м.

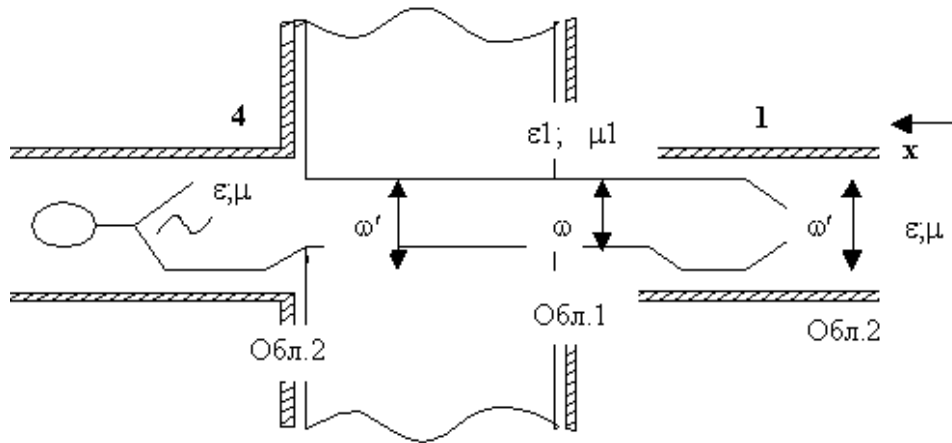


Рис. 3. Схема полоски.

В общем случае произвольной диэлектрической среды $\mu=1$; $\varepsilon \geq 1$ волновое сопротивление линии определяется как

$$Z_b \sqrt{\varepsilon_{эфф}} = \frac{120\pi}{C_o}, \quad (6)$$

где $120\pi = \sqrt{\frac{\mu_o}{\varepsilon_o}}$; $C = C_o \sqrt{\varepsilon_{эфф}} = C_{p1} \sqrt{\varepsilon_1} + C_{p2} + 2C_{f1} \sqrt{\varepsilon_1} + 2C_{f2}$, (7)

где C_p – емкость плоского конденсатора; C_f – емкость краевого поля.

Величины C_p и C_f зависят от геометрических размеров полосковых переходов и их взаимного расположения внутри экранирующего кожуха. Для этих величин после соответствующих выкладок получены следующие выражения:

$$C_{p1} = \frac{2\omega}{b \cdot \left(1 - t/b - \frac{2s}{b}\right)}; ;$$

$$C_{p2} = \frac{2\omega}{b \cdot \left(1 - t/b + \frac{2s}{b}\right)}; \quad (8)$$

$$\pi C_{f1} = 2rl \ln(1 + rl) - r \left[\ln(r^2 l^2 - 1) \right] \frac{t}{b};$$

$$\pi C_{f2} = 2qm \ln(qm + 1) - q \frac{t}{b} \ln(q^2 m^2 - 1), \text{ где}$$

$$r = \left(l - \frac{t}{b}\right)^{-1}; \quad q = \left(m - \frac{t}{b}\right)^{-1};$$

$$l = 1 - 2 \frac{s}{b}; \quad m = 1 + 2 \frac{s}{b}.$$

После выполнения численных расчетов выбраны оптимальные геометрические размеры камеры нагрева стружки с использованием двух встречных коаксиально-полосковых переходов. Конструкция камеры удовлетворяет всем вышеуказанным условиям термообработки диэлектрических материалов, и при этом камера имеет минимальные размеры. Зона воздействия СВЧ-мощности на обрабатываемый материал с некоторым приближением ограничивается объемом

$$V = L \cdot \omega \cdot h, \quad (9)$$

где L – ширина канала транспортировки стружки; ω – ширина полоски в области заполнения диэлектриком пространства между связанными полосковыми линиями; h – высота внутренней полости транспортировочного канала.

Таким образом, обеспечивается возможность исследования зависимости степени денатурации растительной клетки от скорости нагрева. При этом к малому объему стружки V подводится СВЧ-мощность.

Величина подводимой СВЧ-мощности варьировалась от 0,6 до 4,0 кВт. Зависимость температуры нагрева стружки от нормированной мощности показана на рис. 4.

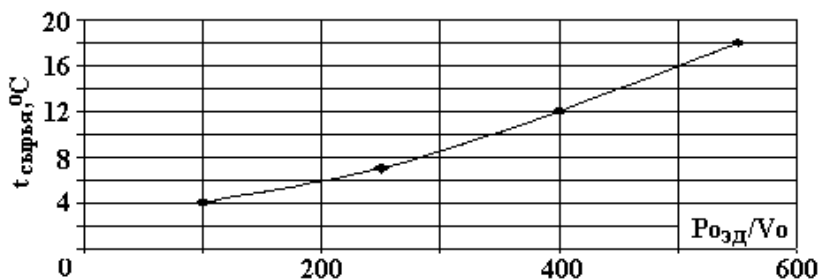


Рис. 4. Влияние нормированной СВЧ-мощности на температуру нагрева свекловичного сырья.

После кратковременного воздействия СВЧ-мощности производилось выслаживание свекловичной стружки в течение 40 минут при температуре 35–40°C. Результаты испытаний сведены в таблице.

Качественные показатели диффузионного сока и свекловичного жома

Суммарная СВЧ-мощность, кВт	Скорость нагрева стружки, $v_{нагр.} \text{ } ^\circ\text{C}/\text{с}$	Показатели диффузионного сока			Цветность, единиц оптической плотности	Дигестия жома, %
		СВ, %	Сх, %	Ч, %		
0,6	0,8	5,41	4,32	79,8	16580	12,46
0,8	1,1	12,8	10,81	83,8	12470	5,97
1,0	1,4	15,11	13,15	87,0	10638	3,64
1,2	1,7	17,47	15,46	88,5	9510	1,32
1,4	1,9	17,93	15,81	88,2	9106	0,95
1,6	2,1	18,29	15,89	86,9	8418	0,89
1,8	2,3	18,84	15,95	84,7	8354	0,83
2,0	2,5	19,45	16,02	82,4	8207	0,74
2,2	2,6	19,72	16,08	81,5	8096	0,71
2,4	2,7	19,85	16,10	81,1	8040	0,68

Из таблицы видно, что максимальный эффект денатурации ткани свекловичной стружки достигается при скорости нагрева от 1,4 до 1,9°C/с. Такая скорость нагрева достигается при удельной затрате СВЧ-мощности около 7 кВт на 1кг сырья. Очевидно, что при меньшей скорости нагрева вследствие конвективных явлений не наступает полного плазмолиза мембран свекловичной клетки, и в диффузионный сок поступает лишь часть сухих веществ. Увеличение интенсивности нагрева ухудшает чистоту получаемого диффузионного сока за счет более жесткого режима разрушения мембран вакуоли. Очевидно, более жесткий режим нагрева приводит к частичному разрушению капиллярно-пористых структур в растительной ткани, а также к частичному выделению протопектина. Улучшение доброкачественности диффузионного сока под действием СВЧ-обработки наблюдается и в случае псевдоимпульсного режима обработки в той же степени, что и в случае непрерывного режима подачи мощности. При этом существенно снижается цветность сока и потери сахара в жоме. Высокая степень плазмолиза свекловичной ткани позволяет вести процесс экстрагирования сахарозы при низких температурах, получать высококачественный диффузионный сок и существенно снизить энергозатраты на производство сахара.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сапронов и др. Общая технология сахара и сахаристых веществ. М., 1984.
2. Силин П.М. Технология сахара. М., 1967.
3. Лысянский В.М., Гребенюк С.М. Экстрагирование в пищевой промышленности. М., 1987.
4. Купчик М.П., Матвиенко А.Б. и др. Интенсификация диффузионного процесса при обработке сокоотружечной смеси электрическим полем // Сахарная Промышленность. 1986. № 4.
5. Даниленко А.М., Купчик М.П., Гулый И.С. и др. Создание эффективного устройства СВЧ-обработки свекловичной стружки // Электронная обработка материалов 2000. №1. С. 72–77.
6. СВЧ-энергетика / Под ред. Э. Окресса, М., 1971.
7. Изюмова Т.И. Волноводы, коаксиальные и полосковые линии. М., 1975.
8. Современные проблемы применения СВЧ-энергии // Материалы международной научно-технической конференции. Саратов, 1996.
9. Справочник по элементам полосковой техники / Под ред. А.Л. Фельдштейна, 1979.

Поступила 08.12.2000

Summary

The pseudo-pulse mode of SHF-treatment (super high frequency) of a vegetative tissue is offered and grounded. The dependence of heating temperature of beet shaving from the normalized SHF-power is investigated. It is established, that the increase of diffuse juice' cleanliness in case of a pseudo-pulse mode SHF-treatment occurs in the same degree, as in case of a continuous mode. The high degree of a beet tissue SHF-plazmolysis allows to carry out the extracting of sucrose at low temperatures and to receive high-quality diffuse juice.

В.С. Коваленко

МАШИНОСТРОЕНИЕ В НОВОМ ТЫСЯЧЕЛЕТИИ

*Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт”,
пр. Перемоги, 37, 03056, Киев, Украина*

Двадцатый век принес человечеству небывалый расцвет науки и техники, современная промышленность стала решающим фактором в развитии экономики ведущих стран мира.

Несмотря на предлагаемую в последние годы модель развития цивилизованных стран по сценарию: индустриальное общество – информационное общество, как первая стадия постиндустриального общества, роль промышленного развития и, в частности, развития машиностроения ни в коей мере не у mažается. Наоборот, промышленность, машиностроение создают новые возможности для развития материальной базы информационных технологий, которые в свою очередь способствуют дальнейшему совершенствованию первых. Так, появление мощных быстродействующих компьютеров позволило выйти современным технологиям, машиностроению в целом на качественно новый уровень. Этому также способствуют и новые концепции и воззрения, получаемые в последние годы все большее признание и развитие в машиностроении. В то же время близится приход новых поколений компьютерной техники с уникальными возможностями: оптические, компьютеры на базе ДНК, молекулярные, квантовые. Создание таких компьютеров невозможно без разработки и использования новейших высоких технологий, интенсивного развития индустриального потенциала общества. Таким образом, будущее машиностроения видится как прочный сплав новейших технологий обработки материалов, изготовления изделий и новейших компьютерных технологий.

Концепция жизненного цикла в реализации продукта

Современное общество требует от инженера-машиностроителя решения комплексной проблемы – создаваемый продукт должен отвечать следующим требованиям:

Для выполнения указанных требований и обеспечения контроля над их соблюдением весь жизненный цикл продукта (изделия) должен представлять собой взаимосвязанную систему, все этапы которой (проектирование – изготовление – сбыт – эксплуатация – утилизация) жестко детерминированы и представляют собой замкнутую систему. Причем уже на стадии проектирования должны просматриваться основные характеристики последующих стадий (рис.1). Возможность получения максимальной информации на ранних стадиях цикла позволяет оценивать, анализировать, сравнивать и оптимизировать состояние изделия на каждой стадии и, в результате, вносить необходимые коррективы при минимальном уровне затрат на их реализацию. Совершенно очевидно, что воплощение данной концепции в практику требует использования новейших мощных быстродействующих компьютеров, составление объемных банков данных, разработки специального программного продукта.

Технологии на основе виртуальной и усиленной реальности в реализации продукта

Вне зависимости от вида продукта при его реализации обычно учитывается три вида факторов:

– профессиональные. Специалисты разных профессий, разного уровня, с разными представлениями участвуют в реализации продукта. Для устранения трудностей взаимопонимания, временных затрат при их общении для достижения общей цели нужен эффективный универсальный инструмент (методика, технология и пр.);

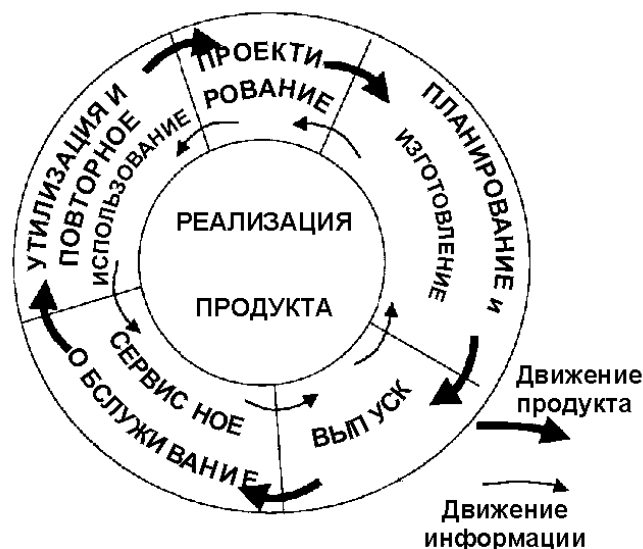


Рис. 1. Концепция жизненного цикла реализации продукта:

1 – оптимально выполнять предназначенную функцию; 2 – не причинять вреда экологии в процессе изготовления, эксплуатации и утилизации; 3 – иметь оптимальную себестоимость, материалоемкость, энергоемкость и т.п.

– географические. В глобальном рынке для эффективной реализации продукта разные стадии реализации происходят в разных местах (предприятиях, странах, континентах). Поэтому для достижения цели нужно преодолеть дистанционные, языковые барьеры, учесть местные традиции, обычаи, особенности и т.п.;

– временные. Для синхронизации всех стадий реализации продукта в разных условиях различных временных зон также нужен универсальный быстродействующий инструмент, который легко интегрируется в современные средства связи (электронная почта, спутниковая связь и т.п.).

Все эти социально-ориентированные проблемы могут быть комплексно решены лишь при эффективном использовании новых компьютерных информационных технологий, реализующих возможности современных мощных быстродействующих компьютеров.

В технологиях, основанных на виртуальной реальности (ВР), генерируемая компьютером среда полностью оторвана от реального мира, а пользователь целиком погружен в виртуальный мир. В технологиях, основанных на усиленной реальности (УР), виртуальная среда является лишь частичным представлением реального мира, на который она проецируется. Пользователь же полностью не погружен в виртуальный мир.

В технологиях, основанных на комбинации виртуальной и усиленной реальности (ВУР), создается виртуальная среда, которая может быть использована на каждой стадии жизненного цикла реализации продукта. Созданная с помощью ВУР среда дает возможность разработчику представить себе, как продукт будет обрабатываться на каждой стадии жизненного цикла его реализации, и при этом разработчик может виртуально вмешиваться в процесс на этапе проектирования с целью повышения эффективности всего жизненного цикла продукта [1]. На рис. 2 показана схема получения разработчиком комбинированной (виртуальной и реальной) визуальной информации с помощью специального информационного головного шлема. По одному каналу информация от компьютера подается через монитор в поле зрения разработчика. При использовании специального оптического устройства, установленного в поле зрения разработчика, подаваемое виртуальное изображение комбинируется (накладывается) с реальным изображением, наблюдаемым разработчиком в реальной среде на разных стадиях жизненного цикла продукта. Положение головы при этом оценивается соответствующими датчиками с тем, чтобы синхронизировать во времени и пространстве информационные потоки по двум каналам.

Быстро перестраиваемые производственные системы

Динамичные социальные и технологические изменения, характерные для второй половины XX столетия, равно как и возрастающая глобализация экономической конкуренции требуют разра-

ботки производственных систем, быстро адаптирующихся к динамичным изменениям рынка. Эволюция производственных систем для этого периода может быть представлена в следующем виде:

I. Поточные автоматизированные линии (DML – Dedicated Manufacturing Lines). Предложены в начале 60-х годов. Характеризуются высокой производительностью, ограниченной номенклатурой изделий, низкой конкурентоспособностью.

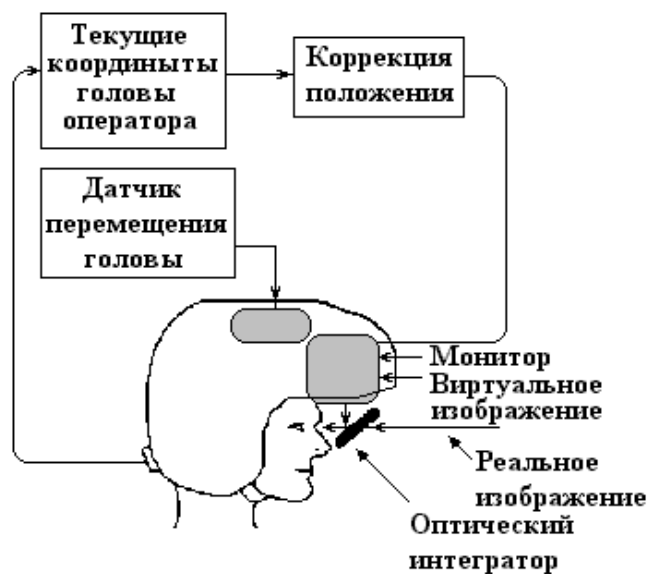


Рис. 2. Схема реализации продукта с помощью технологии на основе усиленной реальности.

II. Гибкие производственные системы (FMS – Flexible Manufacturing Systems). Предложены в начале 70-х годов. Характеризуются высокой производительностью, расширенной номенклатурой, недостаточной конкурентоспособностью.

III. Быстро перестраиваемые производственные системы (RMS – Reconfigurable Manufacturing Systems). Предложены в середине 90-х годов. Характеризуются высокой производительностью, отсутствием ограничений по номенклатуре, высокой конкурентоспособностью.

Последний тип производственных систем, основанный на гибком использовании блочных элементов оборудования, позволяет быстро перенастраивать производство в соответствии с постоянно изменяющимися потребностями рынка [2]. Очевидно, он будет характерен и для начала нового столетия.

Новые концепции в проектировании машин

Главное направление в разработке машиностроительной техники и в частности станков – создание интеллектуальных машин, производственных систем, способных самостоятельно адаптироваться к изменяющимся условиям, выбирать оптимальные условия функционирования.

В то же время предлагается новая парадигма в создании машин: вместо разработки машины, которая может выполнять любую работу человека, нужно создавать машины для выполнения работ, которые человек не может выполнять, или не хочет выполнять. При автоматизации и роботизации машиностроения должны учитываться важные социально-экономические факторы:

- наличие работы для человека;
- справедливость распределения доходов в «автоматизированном» обществе.

Интенсивно развиваются станки с параллельной кинематикой, что позволяет уйти от значительных усилий резания, массивных узлов, мощных приводов при создании обрабатывающего оборудования. При этом используются главные базовые механизмы типа – трипода, гексапода, гексаглайда (Tripod, Hexapod, Hexaglide). В таких системах компактная рабочая головка (шпиндель) с помощью трех и более телескопических подвижных стоек имеет возможность сообщить скоростной шаровой фрезе 6 степеней свободы при обработке деталей сложной пространственной формы.

Главное достоинство такого оборудования – параметры процесса обработки могут постоянно уточняться, а управляющий алгоритм может адаптироваться к изменяющимся условиям. Такие машины являются хорошим примером реализации базовой идеи замены материалоемких систем программным продуктом. Для использования всего потенциала новой концепции создания станков

должны быть предусмотрены возможности самокалибровки инструмента, адаптивного изменения подачи, скорости резания, полного контроля процесса.

Повышение надежности и долговечности деталей и инструмента

Среди различных методов повышения надежности и долговечности деталей машин и инструмента особое внимание привлекают поверхностные упрочняющие технологии – классические методы химико-термической обработки, методы поверхностного пластического деформирования, упрочнение плазменной струей, лазерное упрочнение, нанесение износостойких покрытий, комбинированные методы упрочняющей обработки и т.п.

В частности, в инструментальной промышленности возрастает роль износостойких покрытий, наносимых на рабочие поверхности режущего инструмента. В промышленно развитых странах уже сейчас от 40 до 80% всех операций механической обработки осуществляется режущим инструментом с износостойкими покрытиями. Причем в больших компаниях используется до 65% таких инструментов, в то время как в малых – до 35%. Наиболее распространенными износостойкими покрытиями являются карбиды и нитриды титана (TiN, TiC). Доля инструментов с такими покрытиями от общего количества инструментов с покрытиями составляет 2/3 [3]. Среди новых композиций для износостойких покрытий перспективными являются MoS₂, WC/C и др.

Удобным и перспективным средством повышения эксплуатационных характеристик деталей, инструмента, штампов, пресс-форм является лазерное поверхностное упрочнение. С помощью современного оборудования операция упрочнения осуществляется с высокой производительностью при малых затратах, обеспечивая повышение износостойкости в 3-6 раз. Оптимизация процесса позволяет существенно повысить эффективность лазерного поверхностного упрочнения [4].

Для упрочнения рабочих поверхностей значительной площади наиболее целесообразно использовать плазменную струю. Этот способ и в дальнейшем будет оптимальным при необходимости повышения износостойкости поверхности крупных прокатных валков, рабочих поверхностей различных габаритных деталей.

Микро- и нанообработка

В машиностроении ряда стран, не имеющих энергетических и сырьевых ресурсов, но обладающих значительным интеллектуальным и техническим потенциалом, серьезный акцент делается на развитии наукоемких технологий и оборудования, связанных с миниатюризацией выпускаемой продукции, снижением уровня ее материалоемкости и энергоемкости. Прежде всего, среди таких стран следует назвать Швейцарию и Японию, известных своими уникальными разработками в часовой промышленности и в приборостроении. Большое внимание этому направлению развития машиностроения и приборостроения уделяется также в США, Германии, Великобритании и Франции.

Япония добилась огромных успехов в области микротехники и микротехнологии и успешно осваивает диапазон наноразмеров в технике и технологии. Учитывая важность и приоритетность для страны развития данного научного и технологического направления правительством утвержден Национальный проект по разработке микротехники и микротехнологии. В рамках этого проекта в декабре 1999 г. в Токио состоялась выставка микро станков для обработки и сборки супермалых деталей и узлов. Такие детали и узлы необходимы для создания микро- и наноприборов, суперкомпактных механизмов, например, микронасосов для перекачки крови при локальной блокировке кровеносных сосудов, нанороботов для перемещения внутри кровеносных сосудов при выполнении уникальных операций и пр.

При освоении нанотехники и нанотехнологии используется опыт, накопленный в экспериментальной физике при манипулировании со сверхмалыми частицами с точностью до нанометров. Так, специалистами ряда научных центров Швейцарии, а также японскими учеными разрабатывается наноробот для выполнения сверхпрецизионных операций (рабочая зона робота составляет 1 см, точность выполнения операций – 10 нм) [5].

Рассматриваемое направление будет активно развиваться в будущем, так как позволит более рационально использовать материальные и энергетические ресурсы при изготовлении сложных наукоемких изделий, даст возможность выйти на принципиально новые технические решения.

Синтез трехмерных объектов

В последние годы заметно возрастающее влияние естественных наук на развитие техники и, в частности, на развитие машиностроения. Это существенно отразилось на становлении биомеханики, бионики и других современных отраслей науки и техники. В технологии обработки материалов это влияние проявилось в использовании естественного принципа роста биологических объектов.

С использованием новейших достижений науки и техники от классического принципа – послойного удаления с заготовки всего лишнего до получения детали заданной формы и размеров удалось прийти к реализации качественно нового принципа – послойному наращиванию (росту) детали до получения изделия с требуемыми параметрами. Особая роль в разработке различных методов синтеза трехмерных объектов принадлежит лазерному излучению [6], хотя для некоторых методов возможно использование электроразрядного, электрохимического и других процессов воздействия на материал.

В зависимости от особенностей технологии, типа используемого лазерного излучения и материала выращиваемого объекта процесс известен под следующими названиями:

Optical Fabrication (OP) – оптическая обработка;

Rapid Prototyping (RP) – быстрое прототипирование;

3D-component Forming (3DCF) – формирование трехмерных объектов;

Solid Freeform Fabrication (SFF) – получение изделий сложной формы;

Stereolithography Processing (SLP) – стереолитографическое изготовление;

Laminated Object Manufacturing (LOM) – изготовление слоистых объектов;

Direct Light Fabrication (DLF) – изготовление направленным светом;

Selected Laser Sintering (SLS) – избирательное лазерное спекание.

Разработка технологий синтеза трехмерных объектов позволяет изготавливать детали с заданными свойствами различных участков детали, значительно сократить цикл от чертежа к готовому изделию, очень быстро (в течение нескольких часов) изготовить деталь (или ее модель, прототип) сложной пространственной формы без использования специального инструмента и оснастки.

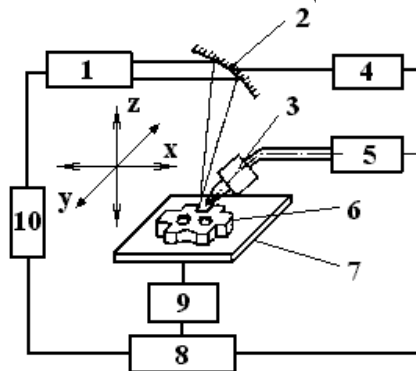


Рис. 3. Схема синтеза трехмерных объектов из металлических порошковых материалов сканирующим лазерным излучением:

1 – лазер; 2 – сканатор; 3 – порошковый питатель; 4 – привод сканатора; 5 – смеситель порошков; 6 – выращиваемый объект; 7 – рабочий стол; 8 – система управления; 9 – привод стола; 10 – источник питания оборудования.

До недавнего времени, пользуясь рассматриваемыми технологиями, можно было изготавливать детали в основном из различных видов пластмасс, керамики, плотной бумаги, пропитанной клеем, металлических пластин и фольг. Серьезные успехи, достигнутые в последние годы в области лазерной наплавки металлических композиций, позволили реализовать технологию выращивания трехмерных металлических объектов (рис. 3) [6]. В этом случае можно программировать не только форму и размерные характеристики получаемых деталей, но и состав материала, а, следовательно, и свойства детали в разных ее сечениях. Благодаря таким уникальным характеристикам технологии она в ряде случаев получила и новое название – прямое осаждение металла (DMD – Direct Metal Deposition). Такая технология очень перспективна для получения сложных полостей штампов, литейных форм, пресс-форм, другой оснастки для изготовления деталей давлением, а также для ремонта износившихся участков такой дорогостоящей оснастки [7].

По принципу синтеза трехмерных объектов при создании моделей (прототипов) изделий предложена технология послойного “выращивания” объекта путем локального замораживания микропорций воды, подаваемой от дозатора по программе сканирующим соплом. Полученная модель может быть использована для получения, например, полости крупногабаритной литейной формы. Определяются другие возможные области использования новой технологической разработки [8].

Очевидно, что в будущем с увеличением сложности пространственной формы изделий, неизбежным ростом номенклатуры таких изделий при одновременном снижении серийности выпуска,

необходимости частых изменений выпускаемой продукции, диктуемых потребностями рынка, роль различных технологий синтеза трехмерных изделий неизмеримо возрастет.

Лазерная технология

В этой сравнительно новой области науки и техники в последние годы наблюдается настоящий бум, связанный как с созданием новых типов лазеров, так и с появлением новых применений лазерного излучения. Одним из главных недостатков лазерных систем до недавнего времени считался низкий КПД излучателей, приводящий к большому потреблению электроэнергии, требующий использования специальных систем охлаждения, обуславливающий значительные габариты технологического оборудования. Появление надежных и доступных полупроводниковых лазеров (имеющих КПД до нескольких десятков процентов) позволило использовать их для накачки мощных лазеров на твердом теле, что повысило эффективность лазеров на алюмоиттриевом гранате (АИГ), а также значительно упростило конструкцию технологических установок. Сейчас уже разработаны установки с мощностью излучения до нескольких киловатт. Их можно использовать для упрочнения, сварки, наплавки и т.п. Следующим шагом является создание малогабаритных матричных полупроводниковых лазеров мощностью до нескольких сотен ватт, которые в скором времени явятся серьезными конкурентами другим существующим типам лазеров. Излучение этих лазеров так же, как и излучение твердотельных лазеров на АИГ может сравнительно легко транспортироваться на значительные расстояния, подаваться в труднодоступные места с помощью оптических волоконных световодов, что является важным достоинством указанных типов лазеров.

Совершенно новые технологические возможности предлагают так называемые световолоконные лазеры (Fiber Optics Laser). В них активной средой является само волокно, компактно собранное на катушке, а оптическая накачка осуществляется полупроводниковыми лазерами. Излучение эмиттируется из торца волокна. В настоящее время уже имеются образцы таких лазеров с мощностью излучения до нескольких десятков ватт. Усилия специалистов направлены на достижение мощности на 2–3 порядка выше [9].

Появились также довольно надежные эксимерные лазеры, генерирующие излучение в ультрафиолетовой области электромагнитного спектра. Благодаря очень малой длине волны излучения и наносекундным импульсам с помощью этих лазеров удастся выполнить уникальные операции микрообработки с высокой производительностью. Применение ультрафиолетового лазерного излучения для суперфинишной обработки оптических поверхностей и ответственных элементов оптоэлектроники позволяет получить качество поверхности, не достижимое никакими другими существующими методами. Такая лазерная поверхностная обработка позволяет управлять параметрами микрорельефа поверхности в пределах от нескольких нанометров до долей нанометра. Так, при суперфинишной лазерной обработке поверхности монокристалла кремния съем материала составляет 0,32 ангстрема за импульс [10]. Такое качество поверхности необходимо, например, при суперфинишной обработке ответственных деталей рентгеновского телескопа, создаваемого в соответствии с Национальным проектом Японии, для поиска новых галактик и изучения высокоэнергетических астрофизических явлений.

Вместе с тем до сих пор актуальны и находят широкое распространение лазеры на CO_2 . Несмотря на ряд недостатков на сегодняшний день они обеспечивают самую высокую среднюю мощность излучения относительно доступными средствами. Наиболее распространены лазерные производственные комплексы с уровнем мощности 2–6 кВт. При многолучевой обработке используются лазеры мощностью 15–45 кВт. В связи же с конверсией военно-промышленного комплекса изучается возможность применения для промышленных целей сверхмощных лазеров на CO_2 [11].

Особые перспективы развития лазерная технология имеет в автомобилестроении в связи с началом широкого использования листового алюминия и его сплавов при изготовлении кузовов автомобиля. Эта тенденция развивается в связи с тем, что применение алюминия ведет к 25% сокращению затрат на изготовление автомобиля и дает существенные выгоды при его эксплуатации (в частности, сокращение расхода топлива благодаря уменьшению веса). Широкое же применение алюминия в автомобилестроении возможно лишь при использовании высокоэффективных процессов лазерного раскроя и лазерной сварки листового алюминия.

Наряду с совершенствованием уже ставших традиционными лазерных технологий размерной обработки, упрочнения, сварки и т.д. среди новых применений лазера нельзя не упомянуть лазерную маркировку, гравирование изделий, нанесение закодированных аудио- и видеoinформации на компакт-диски, что равнозначно революции в информационных технологиях. Возможности совершенствования в этой области далеко не исчерпаны, особенно в плане повышения разрешающей

способности и, следовательно, компактности различных систем при разработке лазеров с очень малыми длинами волн излучения.

Большие резервы в расширении возможностей использования лазерного излучения кроются не только в уменьшении длины волны излучения, но и в сокращении длительности лазерных импульсов. Так, при использовании фемтосекундных импульсов реализуется механизм разрушения материала путем абляции, что позволяет реализовать особо качественную прецизионную размерную обработку (без следов оплавления или испарения материала) [12].

Развитие лазерной технологии далеко от насыщения и в будущем можно предвидеть целый ряд ярких новых уникальных применений лазерной техники и технологии [13].

Другие нетрадиционные методы обработки материалов

Эти методы обработки охватывают все технологии, основанные на механизмах, отличных от механического воздействия на материал. До недавнего времени их объединяли названием «Электрофизические и электрохимические методы обработки». В связи с появлением процессов, не вписывающихся в эту систему, получают распространение новые названия – “физико-технические методы обработки”, “обработка материалов по специальным технологиям”, “нетрадиционные методы обработки”. В последнее время эти методы интенсивно развиваются, и прогнозируется их еще более активное развитие и внедрение в производство.

Электрохимическая обработка занимает прочные позиции в аэрокосмическом комплексе при необходимости изготовления сложнопрофильных деталей из труднообрабатываемых жаропрочных сплавов. Высокая производительность и качество обработки, отсутствие остаточных напряжений, зоны термического влияния, заусенцев после обработки являются существенными достоинствами технологии, определяющими ее дальнейшее использование и развитие [14].

Электроразрядная обработка является до сих пор одним из самых распространенных методов нетрадиционной обработки и благодаря своим уникальным возможностям и достигнутому уровню развития останется таковым и в ближайшие годы. Особенно интересные результаты следует ожидать в микрообработке, где уже и сейчас имеются уникальные достижения [15].

Биообработка. Очень необычный метод биологической размерной обработки металлических материалов разрабатывается в лаборатории нетрадиционной обработки Университета Окаяма в Японии. Суть предложенного метода заключается в использовании для сверхлокального разрушения материала особого вида бактерий, способных "перерабатывать" или "есть" металл. В природе существуют микроорганизмы, которые в качестве источника энергии используют энергию окисления неорганического вещества (например, железа, серы). Это бактерии типа тиобациллус феррооксидант (*Thiobacillus ferrooxidans*) и тиобациллус тиооксидант (*Thiobacillus thiooxidans*). Так, например, бактерия тиобациллус феррооксидант может получить энергию при окислении двухвалентного железа. Эта бактерия имеет очень малые размеры – диаметр около 0,5 мкм, длина 1 мкм, что является большим преимуществом при микрообработке (нанообработке), так как объемы удаляемого материала будут очень малы. Другим преимуществом такого вида обработки является полное отсутствие дефектного слоя или зоны термического влияния после выполнения процесса.

При обработке поверхность материала, не подлежащая обработке, изолируется путем нанесения маски на поверхность фотолитографическим способом. При экспериментальных исследованиях обнаружено влияние различных факторов на производительность процесса (съем материала), что позволяет в широких пределах управлять процессом обработки [16].

Предложенный новый метод микрообработки делает лишь первые шаги, но уже сейчас видны уникальные возможности его дальнейшего использования при изготовлении микро- и наноизделий.

Очевидно, что разработка и изготовление машин и приборов новых поколений в будущем будут возможны лишь при широком использовании рассмотренных физико-технических методов обработки материалов и других видов нетрадиционных технологий.

Некоторые проблемы инженерного образования

До недавнего времени общество недооценивало роль и значение инженерного образования. Вспомним падение престижа инженерных специальностей на Украине, в различных странах СНГ в последние два десятилетия. Подобное наблюдалось и в наиболее индустриально развитых странах. Так, в Германии в последние десятилетия наблюдалось снижение интереса молодежи к инженерным наукам до 30% [17]. Масс-медиа, школы ориентировали выпускников на овладение гуманитарными специальностями, обучение праву, менеджмента, маркетинга, социологии и т.п. Подобное наблюдалось и в США, и в Японии, и в ряде других стран. В результате это привело к отсутствию квалифици-

рованных кадров в ряде приоритетных отраслей науки и техники [18], а во многих случаях даже к весьма плачевным последствиям. Так, в Японии, известной сверхвысоким уровнем индустриализации, в последние годы наблюдались серьезные техногенные аварии – на атомной станции вблизи Токио, в туннелях сверхскоростного поезда “шинкансен”, при запуске японской ракеты со спутником и др. В условиях очень высокой плотности населения на японских островах такие аварии могли привести к чрезвычайным последствиям. Общественность страны видит одну из причин создавшейся ситуации в дезориентации школьников при выборе профессии и отвлечении талантливой молодежи от овладения инженерными специальностями [19].

Схожая ситуация наблюдается и на Украине, а также в других странах бывшего СССР. Однако последствия искаженной профориентации молодежи могут быть намного катастрофичнее вследствие экономической нестабильности и отсутствия должного контроля над состоянием ответственных технических объектов, которые определяют жизнедеятельность общества и всей страны в целом. Отток талантливой молодежи от инженерных и в особенности машиностроительных специальностей может отбросить экономику этих стран на много лет назад и лишить перспективы восстановления и дальнейшего развития промышленного и научного потенциала, явиться причиной сложных техногенных ситуаций. Последние трагические события в России, связанные с катастрофой атомной подлодки «Курск» в Баренцевом море, с грандиозным пожаром на Останкинской телевизионной башне, с несанкционированным попаданием ракеты в украинский сухогруз на Черном море, с неуправляемым полетом боевой ракеты «земля-земля» на учебных стрельбах на Украине, с чрезвычайной ситуацией в Николаевской области, вызванной отравлением почвы ракетным топливом и с другими недавними опасными инцидентами, связанными с использованием современной сложной техники, являются печальными подтверждениями высказанного тезиса.

Для устранения подобной опасности, снижения риска техногенных катастроф, неизбежных вследствие очень интенсивной индустриализации экономики и в следующем столетии, в ряде стран разрабатываются специальные программы, проводятся масштабные акции, используются средства массовой информации, направленные на обеспечение науки и промышленности квалифицированными инженерными кадрами в будущем, благодаря которым уже наблюдаются переломные моменты в профориентации абитуриентов.

Заключение

1. Наблюдаемая интеграция информационных технологий во все стадии машиностроительного производства будет способствовать дальнейшей рационализации изготовления продукции, направленной на снижение энергоемкости, материалоемкости изделий, оздоровление экологии, улучшение социально-экономической ситуации в обществе.

2. Глобализация экономики, постоянно растущая конкуренция в условиях свободного рынка требует от производителя продукции использования быстро переналаживаемого производства, гибких и легко адаптирующихся к изменяющимся условиям технологических систем.

3. Разработка и широкое внедрение новейших высокоэффективных технологий, основанных на последних достижениях фундаментальных наук в производство, является приоритетным фактором в развитии современной экономики.

4. В условиях повышенного риска техногенных катастроф в высокоиндустриальном обществе особое значение приобретает проблема своевременной и достаточной подготовки высококвалифицированных инженерных и научных кадров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lu S.C., Shpitalny M., Gadh R. Virtual and Augmented Technologies for Product Realization // Annals of the CIRP Vol. 48/2, 1999. P. 471–495.
2. Koren Y., Heisel U., Pritschow G. et al. Reconfigurable Manufacturing Systems // Ibid. P. 527–540.
3. Klocke F., Krieg T. Coated Tools for Metal Cutting – Features and Applications // Ibid. P. 515–525.
4. Volodymyr S. Kovalenko. Ways to Intensify Laser hardening Technology // Annals of the CIRP. Vol. 47/1, 1998. P. 133–136.
5. Gerhard Schweitzer. Technology in Switzerland – on the Way to Intelligent Machines. Internal Documents and Reports, 49th General Assembly of CIRP, Montreux, Switzerland, 1999. P. 9–16.
6. Коваленко В.С. Лазерный синтез трехмерных объектов машиностроения // Информатизация та новітні технології. 1996. № 4. С. 37–40.

7. *Tim Skaszek*. Laser gives obsolete tooling new life // *Industrial Laser Solutions*. 2000. Vol. 15. N 9. P. 11–12.
8. *Leu M.C., Zhang W., Sui G.* An Experimental and Analytical Study of Ice Part Fabrication with Rapid Freeze Prototyping // *Annals of the CIRP*. 2000. Vol. 49/1. P. 147–150.
9. *Gregg Susha, Heindrich Endert*. Fiber laser have advantages // *Industrial Laser Solutions*. 2000. Vol. 15. № 1. P. 7–9.
10. *Namba Y., He Y.L.* An Investigation of a Unit-Machined Shape for the Three-Dimensional Micromachining of Silicon Surfaces with a Pulsed Ultraviolet Laser // *Int. J. Japan Soc. Pres. Eng.* 1998. Vol. 32. № 1. P. 13–18.
11. *Robert J. Hull, Michael L. Lander*. Experiments in Laser Cutting of Thick Steel Sections Using a 100-kW CO₂ Laser // *Proceedings of ICALEO 2000, Dearborn, Michigan, USA 2000*. Vol. 89. P. B78–B86.
12. *Said A.A., Maynard R., Bado Ph.* Machining of Refractory metals with Femtosecond Laser Pulses // *Proceedings of ICALEO 2000, Laser Microfabrication, Dearborn, Michigan, USA, Vol.90, 2000*. P. A21–A26.
13. *Коваленко В.* Лазерні технології: завоювання нових позицій // *Вісн.НАН України*. 2000. № 1. С. 11–22.
14. *Rajurkar K.P., Zhu D., McGeough J.A., Kozak J., De Silva A.* New Developments in Electro-Chemical Machining // *Annals of the CIRP*. 1999. Vol. 48/2. P. 567–579.
15. *Коваленко В.С.* Нетрадиционные методы обработки материалов в Японии // *Электронная обработка материалов*. 2000. № 3. С. 4–12.
16. *Uno Y., Kaneda T., Yokomizo S.* Fundamental Study on Biomachining (Machining of Metals by *Thiobacillus Ferrooxidans*) // *JSME International Journal*. 1996. Ser. C. Vol. 39. № 4. P. 837–842.
17. *Prof. H.K. Tonshoff*, President of CIRP, Presidential Address // *Internal Documents and Reports, 49th General Assembly of CIRP, Montreux, Switzerland, 1999*. P. 5–8.
18. *Laurin T.C.* A Shortage of Engineers and Scientists // *Photonics Spectra*. April 2000. P. 13.
19. *Sims C.* Engineering Mishaps Erode Japan's Confidence in Its Technology // *International Herald Tribune*. 1999. Dec. 4–5. P. 5.

Поступила 07.12.2000

Summary

Some latest trends in machine building developments are discussed – life-cycle concept in product realization, virtual and augmented reality in product realization, new concepts in machine tool design, reconfigurable manufacturing systems, micro and nanomachining, laser technology, rapid prototyping with laser and other technique, other nontraditional material machining. Some problems of today engineering education are touched as well.

М.А. Фатыхов

ИЗУЧЕНИЕ ПЛАВЛЕНИЯ ПАРАФИНОВОЙ ПРОБКИ В КООКСИАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ ЭНЕРГИЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

*Башкирский государственный университет,
ул. Фрунзе, 32, г. Уфа, 450074, Башкортостан, Россия*

Многие технологические процессы связаны с необходимостью исследования многофазных сред при воздействии внешних физических полей. В частности, представляет практический и научный интерес изучение влияния электромагнитных полей на фазовые переходы типа плавление сред. Постановка подобной работы имеет большое практическое значение в связи с необходимостью разработки физических основ, техники и технологии ликвидации различных отложений (парафина, льда, газовых гидратов и др.) в трубах, применяемых в нефтегазопромысловом оборудовании, в узлах устройств нефтегазоперерабатывающих предприятий, в быту, в других отраслях народного хозяйства.

Целью настоящей работы является изучение принципиальной возможности плавления отложений в коаксиальных системах применительно к нефтяным или газовым скважинам, в которых распространяется высокочастотная или сверхвысокочастотная электромагнитная волна.

Следует заметить, что нет принципиального различия в механизме взаимодействия высокочастотных и сверхвысокочастотных электромагнитных волн со средами, а могут отличаться лишь способы их генерирования и ввода в среду. Поэтому мы будем пользоваться термином высокочастотное электромагнитное поле, имея в виду и сверхвысокочастотный диапазон.

Для осуществления такого способа ликвидации отложений в скважине необходимо, во-первых, всю энергию, отдаваемую ВЧ генератором, по возможности без потерь в коаксиальной линии, соединяющей генератор со скважиной (фидер), передать в последнюю, во-вторых, обеспечить условие распространения всей подводимой энергии ВЧ электромагнитных колебаний по коаксиальной линии до нижнего конца пробки, в-третьих, теоретически и экспериментально исследовать динамику изменения температуры в скважине и др. Каждый из этих вопросов является предметом отдельных исследований.

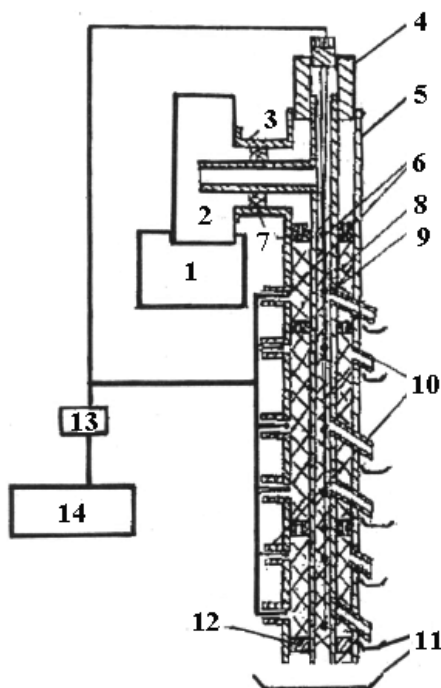
Из вышеприведенных задач в работе изучается принципиальная возможность передачи электромагнитной энергии по коаксиальной линии с заполнением. Исследуются вопросы распределения температуры в коаксиальной системе, заполненной парафином, так как именно температура определяет основные технологические показатели рассматриваемого процесса.

Принципиальная схема экспериментальной установки приведена на рисунке.

Экспериментальная установка работает следующим образом.

Электромагнитные колебания генерируются СВЧ источником и распространяются в прямоугольном волноводе, на конце которого установлена водяная нагрузка. От него с помощью штыря, выступающего от фидера, отбирается СВЧ энергия и передается в межтрубное пространство коаксиальной системы. Электромагнитные волны, распространяясь в межтрубном пространстве, частично затухают в коаксиальной системе из-за конечной проводимости материалов внешней и внутренней труб и диэлектрических потерь в парафине, которым заполнено межтрубное пространство, и отражаются от короткозамыкающего поршня. Таким образом, в межтрубном пространстве образуется стоячая электромагнитная волна. Вследствие затухания электромагнитных волн в этом пространстве

создаются объемные источники тепла. При заданной частоте электромагнитных колебаний интенсивность их определяется электрофизическими параметрами парафина и материалов труб и мощностью электромагнитного поля, поглощенного в этих средах. После достижения температуры плавления парафин стекает на подстилки.



Принципиальная электрическая схема установки: 1 – СВЧ генератор; 2 – прямоугольный волновод; 3 – коаксиально-волноводный переход; 4 – согласующий поршень; 5 – внешняя труба; 6 – термопара; 7 – диэлектрические шайбы; 8 – твердый парафин; 9 – внутренняя труба; 10 – диэлектрические патрубки; 11 – подстилки; 12 – короткозамыкающий поршень; 13 – пакетный переключатель; 14 – регистрирующий прибор.

Было проведено две серии экспериментов: 1) регистрация температуры в трубах и определение количества расплавленного парафина для случая, когда только внутренняя труба заполнена парафином, 2) те же измерения для случая, когда как внутренняя труба, так и межтрубное пространство заполнены парафином. Всего было проведено 20 экспериментов. Коаксиальная система заполнялась парафином, значение диэлектрической проницаемости которой равно 2,3, а значение тангенса угла диэлектрических потерь – 0,0007 на частоте 2400 МГц. Электромагнитная мощность, вводимая в коаксиальную систему, определялась калориметрическим способом и составляла 55 Вт. Сравнивая полученные в этих случаях экспериментальные данные, можно определить степень влияния электромагнитного поля на динамику плавления парафина в коаксиальной системе.

Данные экспериментальные исследования показали, что энергозатраты на плавление 1 м³ парафина в коаксиальной системе данным методом составляют порядка 600 кВт·час.

Наличие парафина в межтрубном пространстве оказывает существенное влияние на динамику его плавления. Время полного плавления парафина для второй серии экспериментов в 1,4 раза меньше, чем для первой серии при одной и той же мощности электромагнитного поля.

Было обнаружено, что вблизи точки ввода электромагнитной энергии в коаксиальную систему значения температуры выше, чем на ее конце, проявляя минимумы внутри трубы. С течением времени температура на концах выравнивается, сохраняя точки минимума. Следовательно, плавление парафина сначала происходит не по всей длине коаксиальной линии. Плавление парафина начинается в ближайшей от места ввода электромагнитной энергии и наиболее интенсивной пучности стоячей волны. С течением времени, т.е. с увеличением количества вводимой в коаксиальную линию электромагнитной энергии, благоприятные условия для плавления парафина наступают в следующей пучности. Процесс продолжается до достижения последней пучности. Одновременно расширяется объем расплавленной области в вышележащих пучностях. Этот процесс плавления можно назвать возвратноциклическим.

При распространении электромагнитных волн в межтрубном пространстве образуется множество чередующихся друг с другом областей, занятых твердым и жидким парафином. Их можно представить как гирлянду парафиновых пробок. Образование их приводит, естественно, к многократному отражению электромагнитных волн в межтрубном пространстве. Эти особенности необходимо учитывать при физическом и математическом моделировании процесса плавления парафиновых и разложения газогидратных пробок в коаксиальных системах с помощью энергии высокочастотного и сверхвысокочастотного электромагнитного поля.

Скважина в радиофизическом отношении представляет собой коаксиальный кабель с заполнением. В связи с тем, что электромагнитная волна проникает достаточно глубоко по коаксиальному кабелю в скважину, весьма перспективным представляется использование энергии высокочастотных электромагнитных полей для плавления смоло-парафиновых и разложения газогидратных пробок, перекрывающих сечение ствола и межтрубное пространство скважины.

Поступила 20.02.2001

Summary

A research has been made into the effects of a superhigh-frequency electromagnetic field on paraffin melting in a short-circuited coaxial system. A principal diagram of an experimental installation is presented. An estimation is made of power requirements for the proposed technique. The presence of paraffin in the annular space has been shown to substantially facilitate the phase transition in the coaxial system.

ИЗ ОПЫТА РАБОТЫ

С.В. Бордусов

СВЧ-ПЛАЗМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ В МИКРОЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ

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

В последние годы наблюдается значительное возрастание интереса к практическому использованию СВЧ-энергии в промышленных целях [1, 2]. При этом отмечается, что быстрое внедрение СВЧ в народное хозяйство стало возможным благодаря разработке недорогих и надежных СВЧ-генераторов [3].

Широкое распространение в различных областях науки и техники СВЧ-энергия находит в виде плазмы газового СВЧ-разряда. Она используется для накачки газовых лазеров [4]; в технике спектрального анализа [5]; в качестве источников света в экспериментах по резонансной флюоресценции для измерений малых концентраций химически активных атомов и двухатомных радикалов [6]; для поверхностной активации полимеров [7]; для разрушения сильно токсичных и канцерогенных веществ [8]; для нанесения твердых покрытий, упрочнения, закалки [9]; в воздушно-реактивных двигателях для целей перемещений летательных аппаратов [4]; в плазмохимических процессах диссоциации воды при получении водорода – перспективного и экологически чистого топлива будущего [10]; синтеза субмикронных порошковых материалов при получении мелкодисперсных абразивов для резки и шлифовки пластин [11]; диссоциации сероводорода, CO_2 [12] и т.д.

К настоящему времени на базе СВЧ-техники разработано большое количество разновидностей устройств, позволяющих на их основе реализовать большинство технологических процессов производства интегральных схем: плазменную очистку и активирование поверхности подложек; эпитаксию; окисление, литографические процессы, включающие сушку, задубливание, экспонирование и удаление фоторезистивных слоев; все виды вакуумно-плазменного травления; осаждение тонких пленок, включающее плазмохимическое осаждение и катодное распыление; легирование (ионную имплантацию); термический отжиг полупроводниковых пластин; модификацию поверхности.

При этом основную роль в реализации вышеназванных процессов играет СВЧ-плазменная технология, так как плазма СВЧ-разряда является эффективным механизмом передачи мощности электромагнитного поля в газ и представляет собой чистый атомарный источник, в котором, как правило, отсутствуют металлические электроды, являющиеся источником загрязнений.

Рассмотрим некоторые характеристики и условия проведения технологических процессов микроэлектроники с использованием энергии СВЧ-полей.

Плазменная очистка и активирование поверхности подложек

Основным компонентом газовой смеси для очистки поверхности подложки от органических загрязнений с использованием СВЧ-разряда является кислород с небольшими (до 1% по объему) добавками аргона, азота или гелия. Добавки H_2 , N_2 , Ar , He катализируют процессы диссоциации молекул кислорода в плазме до атомарного состояния и тем самым ускоряют процесс очистки. Плазменная обработка используется также с целью удаления собственного оксида с поверхности Si в качестве предварительной очистки перед осаждением пленочных слоев различных материалов и составов. В этом случае используется H_2 с добавками H_2O и NF_3 . Как правило, процесс реализуется способом травления “вне зоны разряда” [13–15].

Эпитаксия

В сообщениях об использовании СВЧ-энергии в процессах эпитаксиального выращивания слоев аморфного кремния [16, 17] утверждается о хороших параметрах процессов и высоком качестве получаемых структур, не уступающим по свойствам пленкам, выращенным методом молекулярно-лучевой эпитаксии.

Плазменное окисление

Наибольшее число сообщений о процессах низкотемпературного окисления в кислородной плазме СВЧ-разряда относится к плазменному анодированию кремния (к примеру, [18–20]), хотя есть сведения и об окислении тонких металлических (Al, Ta, Ti, Nb) и полупроводниковых (GaAs, Si) пленок [21, 22]. При этом отмечается, что наряду с более высокими скоростями роста, пленки, формируемые в СВЧ-разряде, отличаются хорошими электрофизическими свойствами. В частности, в работах [18,19] сообщается о получении окисных пленок на кремнии со следующими параметрами: пробивное напряжение порядка $E_d \approx 3,9 \cdot 10^6$ В/см, плотность поверхностных состояний $N_{ss} = 9,5 \cdot 10^{11}$ см⁻², относительная диэлектрическая проницаемость в пределах $\epsilon_{ox} = 3,66–3,97$.

Литографические процессы

В процессе фотолитографии, которая в настоящее время находит наиболее широкое распространение в технологии производства ИС, СВЧ-энергия может использоваться на операциях плазменной очистки подложек, сушки слоя фоторезиста, экспонировании и удалении фоторезистивных маскирующих слоев травления рисунка.

Плазменная очистка подложек. Плазменная очистка подложек используется для повышения адгезии наносимого фоторезистивного слоя к поверхности материала и рассмотрена выше.

Сушка слоя фоторезиста. В сообщениях о применении СВЧ-энергии для сушки и задубливания фоторезистивных пленок при изготовлении их на кремниевых подложках [1, 23] указывается на высокую эффективность этого метода обработки. Процесс сушки длится несколько секунд. При этом сообщается, что при СВЧ-нагреве не только резко повышается производительность, но и устраняется опасность “перегрева” фоторезиста. Улучшается также качество проявления: изображение проявляется мгновенно после погружения в проявитель.

Экспонирование маскирующих слоев. Имеются сообщения [24, 25] об использовании в качестве источников света при экспонировании ламп СВЧ-разрядов низкого давления мощностью от 100 до 500 Вт, интенсивно излучающих в коротковолновой области спектра, что соответствует полосе максимальной чувствительности большинства фоторезистов (300–450 нм).

Удаление фоторезиста. Кроме плазмохимического метода удаления фоторезиста, который будет рассмотрен ниже, СВЧ-энергия может быть использована при удалении фоторезистивной пленки фототермическим методом [26,27], результатом которого является окислительная деструкция пленки в кислороде или кислородсодержащих газах. В [27] приведены результаты работ по удалению промышленно используемых фоторезистов PMMA, OMR, CMS, AZ-1350 J. Удаление фоторезиста осуществлялось при температуре подложки 400–430 К в атмосфере кислорода при давлении $6,6 \cdot 10^4$ Па и скорости потока 50 л/мин под воздействием ультрафиолетового излучения с плотностью потока энергии 2,4 Вт/см², создаваемого СВЧ-разрядной лампой, наполненной смесью аргона с парами ртути. В зависимости от режимов обработки и типа фоторезиста время полного удаления пленки лежит в интервале 15–30 мин.

Вакуумно-плазменное травление

Анализ литературы, посвященной вопросам травления материалов технологии микроэлектроники, показывает, что газовая плазма СВЧ-разряда используется для реализации практически всех процессов вакуумно-плазменного травления, за исключением ионно-плазменного травления. Это, по всей видимости, связано с особенностями поведения ионов (в частности, перемещением их под действием внешнего электромагнитного поля) в плазме, создаваемой СВЧ-полями.

Ионно-лучевое травление (ИЛТ). Процессы ИЛТ реализуются с помощью ионных источников различной конструкции [28], использующих в качестве рабочих газов H₂, He, Ar. Давление газов поддерживается в диапазоне $0,133–1,33 \cdot 10^{-3}$ Па. Использование СВЧ-разрядов позволяет эффективно формировать пучки ионов с энергией 10 – 100 эВ с большими поперечными сечениями (до Ø300 мм) различной конфигурации (круглые, овальные, кольцевые, прямоугольные, H-образные и т.д.). При

этом степень ионизации достигает 30% и выше, а концентрация электронов N_e во много раз (более 100) превышает критическую.

Радикальное травление (РТ). Радикальное травление с помощью плазмы СВЧ-разряда используется при удалении фоторезиста, травлении Si, SiO₂, Si₃N₄ [23, 29]. Процессы реализуются при низких температурах подложек (310–370 К) и характеризуются отсутствием радиационных повреждений и деградации электрофизических параметров обрабатываемых структур.

Реактивное ионно-плазменное травление (РИПТ). При проведении процессов РИПТ обрабатываемые изделия находятся в контакте с плазмой СВЧ-разряда и размещаются, как правило, на электроде, подключенном к источнику СВЧ- [30], ВЧ- [31, 32], НЧ- [33] либо постоянного [34] напряжения. Возможно также их расположение в зоне разряда на заземленном подложкодержателе [35]. Эти процессы отличаются высокой степенью равномерности обработки по пластине – 96–97%, более высокими, по сравнению с обработкой в плазме ВЧ- либо НЧ-разряда, скоростями травления, возможностью селективного управления ходом процесса за счет изменения параметров сигнала, подаваемого на подложкодержатель-электрод.

Реактивное ионно-лучевое травление (РИЛТ). Процессы РИЛТ с использованием плазмы СВЧ-разряда реализуются в газоразрядных системах, использующих явление электронного циклотронного резонанса [28]. К настоящему времени имеются сообщения о травлении с помощью этих газоразрядных систем практически всех материалов микроэлектроники в очень широком наборе газов и их смесей.

Типовые технологические режимы обработки: степень предварительного вакуума не выше $7 \cdot 10^{-4}$ Па, рабочее давление порядка $5 \cdot 10^{-2}$ Па, плотность ионного тока – не менее 5 мА/см², энергия ионов в процессе травления – 20–40 эВ. Такие режимы позволяют осуществлять анизотропное травление с нулевым подтравом под маску с высокой селективностью травления материалов. Например, селективность травления Si к SiO₂ составляет 30:1, селективность травления Mo к SiO₂ – 40:1 и т.д.

Плазменное травление (ПТ). Плазменное травление реализуется в реакционно-разрядных камерах больших объемов [36–38], разработанных специально для обработки кремниевых пластин Ø 150 и 200 мм, при этом конструкции разрядных систем ориентированы на проведение процессов поштучной обработки с целью формирования рисунка в нанесенных на поверхность пленках, глубинного травления материала пластины и т.д.

Радиационно-стимулированное травление. Стимуляция процессов травления материалов может осуществляться потоками ионов, электронов и излучений (инфракрасным, видимой области, ультрафиолетовым и рентгеновским) [39]. При этом поток стимулирующего воздействия и поток частиц, производящих травление, генерируются независимо друг от друга и подаются к обрабатываемой поверхности. При такой организации процесса травления повышаются и количественные, и качественные показатели процесса. Так, например, в [40] предлагается способ, существенно повышающий скорость травления GaAs. Подложка GaAs с маской размещается в камере обработки на вращающемся держателе. С камерой обработки соединены камеры генерации плазмы и генерации ионов. В камеру генерации плазмы до определенного давления напускается Cl₂ и подается СВЧ-мощность. Под воздействием электронного циклотронного резонанса генерируется плазма. Путем подачи напряжения на вытягивающий электрод пучок ионов Cl⁺ направляется в камеру обработки на подложку. Одновременно в камере генерации ионов создаются ионы Ar⁺, которые также направляются на подложку. Ионная бомбардировка приводит к образованию в подложке аморфного слоя толщиной 20–30 нм. При таком способе подачи ионов Ar⁺ и Cl⁺ на подложке не образуются продукты, препятствующие быстрому травлению, и подложка не загрязняется. Таким образом становится возможной селективная сверхчистая обработка.

Осаждение тонких пленок

Плазмохимическое осаждение. Плазмохимическим методом с использованием СВЧ-разряда можно осаждать большое число неорганических и органических соединений – SiO₂, Si₃N₄, Si_xN_y, аморфный кремний, Cd, GeO₂, B₂H₃, Ti_xO_y, Sn_xO_y, Fe₂O₃, гексаметилдисилокан и т.д. [16, 41–44]. При проведении процессов плазменной полимеризации СВЧ-разряды являются более эффективными источниками радикалов и ионов [86], чем широко используемые разряды постоянного тока и ВЧ. И, как следствие этого, они позволяют проводить процессы с более высокими скоростями, обеспечивая большую производительность оборудования.

Катодное распыление. Катодным распылением с использованием СВЧ-разряда получают окисные, силицидные, нитридные и другие пленки [45–47], характеризующиеся большой прочностью сцепления с подложкой и высокими электрофизическими показателями.

Легирование (ионная имплантация)

Наиболее общим применением ионной имплантации, в случае использования в качестве источников ионов СВЧ-разряда [28, 48], является процесс ионного легирования кремния при изготовлении приборов. В качестве легирующей примеси используются ионы бора, индия, фосфора мышьяка с энергией в диапазоне 3–500 эВ, имплантируемые в приповерхностную область кремниевой подложки на глубину 10–100 нм. Нужную концентрацию легирующей примеси в кремнии в диапазоне 10^{14} – 10^{21} см⁻³ получают после отжига (нагрева до выбранной температуры в интервале 870–1270 К). Наряду с ионно-лучевой имплантацией СВЧ-разряды используются в процессах плазменно-ионной имплантации, основанных на приложении к подложке отрицательных импульсов высокого напряжения, обеспечивающих вытягивание ионов из плазмы и ускорение их по направлению к подложке [49]. Главное преимущество плазменно-ионной имплантации перед ионно-лучевой состоит в простоте обработки больших площадей или трехмерных объектов выпуклой формы и возможности использования широкой области ионных энергий от нескольких электрон-вольт до 250 кэВ.

Термический отжиг

Характерной чертой термического отжига в СВЧ-полях является то, что, в отличие от традиционных методов нагрева, при которых тепловой поток на пластину направляется извне, вызывая при этом значительный градиент температур между нагретой поверхностью и центром пластины, при СВЧ-обработке он поступает как бы от “внутреннего” источника тепла, так как пластина нагревается за счет выделения тепла в объеме материала [93].

Исследования по СВЧ-отжигу МОП-структур с мелкозалегающими переходами и БИС с субмикронными размерами [50, 51] показали эффективность данного метода нагрева полупроводниковых пластин. Для предотвращения возникновения разряда СВЧ-нагрев проводится, как правило, при давлении не выше 1 Па в атмосфере азота или аргона [52] при этом, в зависимости от режимов обработки, время выхода температуры подложки на стационарное значение составляет 1–2 минуты.

Модификация поверхности

Под модификацией поверхности в данном случае подразумевается азотирование (нитрирование) поверхности Si-подложек [53, 54] и металлических образцов [28, 55] с целью получения нитридных или оксинитридных слоев. Азотирование проводится как в самом СВЧ-разряде в азоте либо смеси N₂+H₂, так и в послесвечении (т.е. вне зоны разряда). Рабочие режимы процесса (СВЧ-мощность, нагрев подложек, давление и расход газа, состав газовой смеси и т.д.) зависят от обрабатываемого материала и конструктивных особенностей газоразрядного устройства. Формируемые этим способом слои имеют ряд преимуществ в сравнении с полученными термическим путем. Так, например, для тонких слоев нитрида или оксинитрида кремния это, прежде всего, лучшие электрические характеристики пробоя, стабильность зарядовых характеристик слоя при термополевых испытаниях, снижение потенциального барьера для носителей на границе нитрированного диэлектрика с подложкой для уменьшения питающих напряжений РПЗУ с электрическим перепрограммированием [56].

Подводя итоги обзора использования плазмы СВЧ-разряда в технологии микроэлектроники, необходимо отметить, что перспективы ее широкого внедрения в промышленность объясняются, прежде всего, тем, что реализуемым на ее основе процессам присущи высокая энергетическая эффективность, селективность, большая скорость и производительность. Важным фактором является также и то, что в СВЧ-разряде удается получить параметры плазмы (степень ионизации, температура электронов и удельный энергетический вклад), близкие к оптимальным для осуществления большинства плазменных процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гонтарев Г.Г., Глазырин Б.Н., Лысов Г.В. и др. Микроволновое технологическое оборудование и приборы // Обзоры по электронной технике. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1992. Вып. 10 (1681).

2. Батенин В.М., Климовский И.И., Лысов Г.В., Троицкий В.Н. СВЧ-генераторы плазмы: физика, техника, применение. М., 1988.
3. Соколов И.В. Магнетроны для СВЧ-нагрева и источники СВЧ-энергии // Электронная промышленность. 1996. № 3. С. 4–9.
4. Батанов Г.М., Грицинин С.И., Касый И.А. и др. СВЧ-разряды высокого давления // Тр. физ.ин-та. АН СССР. 1985. Вып. 160. С. 174–203.
5. Carnahan Jon W. Microwave induces plasma: a versatile spectroscopic source // Amer.Lab. 1983. Vol. 15. N 8. P. 31–36.
6. Wagner H.Gr., Welzbacher U., Zelbner R. Rate measurements for the reaction $H_2+Cl_2 \rightarrow HCl+Cl$ by Lyman – L fluorescence // Ber. Bunsen Ges. Phys. Chem. 1976. Vol. 80. N 9. P. 902–908.
7. Neusch M., Kieser J. Surface activation of polymers in a microwave plasma // Vacuum. 1984. Vol. 34. N10-11. P. 959–961.
8. Bozzelli J.M., Barat R. Variable power microwaves discharge and cairty // Rev. Sci. Instrum. 1981. Vol. 52. N 4. P. 612–614.
9. Туманов Ю.Н. Низкотемпературная плазма и высокочастотные электромагнитные поля в процессах получения материалов для ядерной энергетики. М., 1989.
10. Мелих-Асланова Т.А., Русанов В.Д., Фридман А.А. и др. Получение водорода в неравновесной плазме СВЧ-разряда // Ин-т физ. АН АзССР. Препр. Вып. 100. 1984.
11. Троицкий В.Н. Основные проблемы синтеза нитридов в низкотемпературной плазме // Синтез в низкотемпературной плазме. М., 1980. С. 4–23.
12. Животов В.К., Русанов В.Д., Фридман А.А. Плазмохимические процессы в СВЧ-разряде // Химия плазмы. 1984. Вып. 11. С. 200–241.
13. Techniques and application of plasma chemistry. Edited by J.R. Hollahan, A.T. Bell. Willey-Interscience Pub. 1974.
14. Microwave plasma clearing system // Microelectron J. 1995. Vol. 26. N 2–3. P. 11.
15. Kikuchi Jun, Nagasaka Mitsuaki, Fujimira Shuzo, Yano Hiroshi, Horuke Yashiro. Clearing of silicon surfaces by NF_3 – added hydrogen and water-vapor plasma down stream treatment // Jap. J. Appl. Phys. Pt 1. 1996. Vol. 35. N 28. P. 1022–1026.
16. Kato I., Wakana S., Hara S. Etc. Microwave plasma CVD system for the fabrication of thin solid films // Jap. J. Appl. Phys. Pt 1. 1996. Vol. 21. N 8. P. L470–L472.
17. Gao Junsi, Narashima Hiroshi, Sakai Naofami. Growth of epitaxial silicon film at low temperature usig sputtering-type electron-cyclotron resonance plasma // Jap. J. Appl. Phys. Pt 2. 1999. Vol. 38. N30. P. L220–L222.
18. Martiret C., Devine R.A.B. Low-temperature oxidation of Si in a microwave electron cyclotron resonance excited O_2 plasma // Appl. Phys. Lett. 1995. Vol. 67. N23. P. 3500–3502.
19. Koromogawa Takashi, Yamasita Akihito. Negative ion assisted silicon oxidation in downstream of microwave plasma // Jap. J. Appl. Phys. Pt 1. 1998. Vol. 35. N9A. P. 5028–5032.
20. Buin Octavian, Kennedy Gary P., Gatner Mariuca, Taylor Stephen. Structure analysis of silicon dioxide and silicon oxinitride films produced using an oxygen plasma // IEEE Trans. Plasma Sci. 1998. Vol. 26. N6. P. 1700–1711.
21. Заявка 57-198266 Япония, МКИ³ C23 F7/02, C23C 11/14. Метод плазменной обработки.
22. Nakamura Ryuichi, Ikoma Hideaki. Magnetically excited plasma oxidation of GaAs // Jap. J. Appl. Phys. Pt 2. 1996. Vol. 39. N1A, P. L8–L11.
23. Попов В.К., Кондрашова А.Т. СВЧ – плазмохимическая обработка // Обзоры по электронной технике. Сер. 7. Технол., организ. произв. и оборудование. Вып 22(922). М., ЦНИИ “Электроника”. 1982.
24. Matthews J., Ury M., Birch A. et all. Microlithography techniques using a microwave powered deep UV source // Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. 1983. P. 172–183.
25. Levine L.S., Ury M.G. Microwave – powered lamp technology for photoimaging // SME Techn. Pap. N437. 1985.
26. Bolon D.A., Kunz C.O. Ultraviolet depolymerisation of photoresist polymers // Polym. Eng. Sei. 1972. Vol. 12. N 2. P. 109–114.
27. Ozawa K., Sto T., Tahikawa H. UV resist – stripping for high – speed and damage – free process // Ex-tended Abstr. 15 Conf. Solid State Devices and Mater., Tokyo, 30 Aug. 1 Sept. 1983. Tokyo, P. 125–128.

28. Гуляев Ю.В., Яфаров В.К. Микроволновое ЭЦР вакуумно-плазменное воздействие на конденсированные среды в микроэлектронике (физика процессов, оборудование, технология) // Зарубежн. электр. техн. 1997. ¹ 1. С. 77–120.
29. Shi J., Kamareni M., Shaner D., Rounts S., Fink S., Ferris D. Damage reduction in dry resist stripping systems // Solid-State Technol. 1995. Vol. 38. N 10. P. 75–82.
30. Заявка 57-174465 Япония, МКИ³ C23 F1/08. Устройство для плазменного травления.
31. Патент 4581100 США, МКИ³ B44C 1/22. Способ травления при комбинированном возбуждении плазмы.
32. Doh Hyun-Ho, Yeon Chung-Kyu, Whang Ki-Woong. Effects of bias frequency on reactive ion etching lag in an electron cyclotron resonance plasma etching system // J. Vac. Sci. and Technol. A. 1997. Vol. 13. N 3. Pt 1. P. 664–667.
33. Arnal J., Pelletier J., Pomot C., Pelit B. et all. Plasma etching in magnetic multipole microwave discharge // Appl. Phys. Lett. 1984. Vol. 45. N 2. P. 132–134.
34. Pichot M.G. Microwave multipolar plasma etching at low pressure: a novel reactor concept // Microelectron. Eng. 1985. Vol. 3. N1/4. P. 411–418.
35. Патент 4559100 США, МКИ³ HOIL21/306. СВЧ-установка для плазменного травления.
36. Singar Peter. New frontiers in plasma etching // Semicond. Int. 1996. Vol. 19. N8. P. 152–154, 156, 158, 164.
37. Bowies Jeffercy H., Duncan Dwight, Walker David N. A large volume microwave plasma source // Rev. Sci. Instrum. 1996. Vol. 67. N 2. P. 455–461.
38. Shirai Haiyume, Sakuma Yoshikazu, Uegama Hiroyaki. The control of the high-density microwave plasma for large-area electronics // Thin Solid Films. 1999. Vol. 37. N 1–2. P. 12–17.
39. Данилин Б.С., Куреев В.Ю. Применение низкотемпературной плазмы для травления и очистки материалов. М., 1987.
40. Заявка 60-165721 Япония. МКИ³ HOIL21/302. Способ реактивно-лучевого травления.
41. Loncar G. Present status of thin oxide films creation in a microwave plasma // Czechosl. J. Phys. 1980. Vol. B30. N 6. P. 688–708.
42. Fukuda Takyua, Saito Katsuaki, Ohue Michio. High-quality, high-rate SiO₂ and SiN films formed by 400 kHz bias electron cyclotron resonance-chemical vapor deposition // Jap. J. Appl. Phys. Pt2. 1995. Vol. 34. N7B. P. L937–L940.
43. Rack M.J., Hilt L.L., Vasileska D., Ferry D.K. Remote plasma enhanced chemical vapor deposition SiO₂ in silicon based nanostructures // J. Vac. Sci. and Technol. B. 1999. Vol. 17. N 5. P. 2204–2208.
44. Farber David G., Bae Sanghoon, Okandan Murat, Reber Douglas M., Kuzma Terena, Fonash Stephen J. Pathway to depositing device-quality 50⁰ C silicon nitride in a high-density plasma system // J. Electrochem. Soc. 1999. Vol. 146. N 6. P. 2254–2257.
45. Pelaunay M., Touchais E. Electron cyclotron resonance plasma ion source for material depositions // Rev. Sci. Instrum. 1998. Vol. 69. N 6. P. 2320–2324.
46. Ono Toshiro, Amazawa Takao, Nishimura Hiroshi, Matsuo Seitaro. Tantalum and tantalum nitride films deposited by electron cyclotron resonance sputtering as barriers to copper diffusion // J. Vac. Sci. and Technol. B. 1999. Vol. 17. N 5. P. 2385–2389.
47. Amazawa Takao, Ono Toshiro, Shimada Masaru, Matsuo Seitaro, Oikawa Hideo. Ultrathin oxide films deposited using electron cyclotron resonance sputter // J. Vac.Sci. and Technol. B. 1999. Vol. 17. N 5. P. 2222–2225.
48. Sekiguchi M., Matsushita H., Jonoshita I., Kobasawa M. Development of a 2.45 GHz electron cyclotron resonance ion source for ion implanter application // Rev. Sci. Instrum. 1998. Vol. 69. N 2. Pt 2. P. 873–839.
49. Le Coeur F., Gagarde T., Pelletier J. Distributed electron cyclotron resonance plasma immersion for large area ion implantation (invited) // Rev. Sci. Instrum. 1998. Vol. 69. N2. Pt2. P. 831–836.
50. Tukanu T., Ito T., Ishikawa H. Microwave annealing for temperature VLSI processing // Int. Electron. Device Meet., Washington, Dec. 1–4, 1985. New-York, 1985. P. 224–227.
51. Заявка 59-22384 Япония, МКИ³ HOI S3/18. Метод изготовления полупроводниковых приборов.
52. Патент 4593168 США, МКИ³ HO5B 6/78. Устройство для термообработки полупроводниковых пластин.
53. Maslehi M.M., Tu C.Y., Sigmon T.W., Saraswat K.C. Low temperature direct nitridation of silicon in nitrogen plasma generated by microwave discharge // J. Appl. Phys. 1985. Vol. 58. N 6. P. 2416–2419.
54. Bera L.K., Baneryec H.D., Ray S.K. Microwave plasma nitridation of silicon dioxide on strained Si // Appl. Phys. Lett. 1998. Vol. 73. N 11. P. 1559–1561.

55. Заявка 4265730 США, МКИ³ С23С 15/00. Устройство для обработки поверхности при использовании плазмы, генерируемой в СВЧ-разряде.

56. *Петров Г.В., Иванцова Н.Д., Сысоев Б.И.* Технологические основы получения и электрические характеристики тонких нитрированных слоев в элементах интегральных схем // *Обзоры по электронной технике. Сер.3. Микроэлектроника. Вып. 6(1315). М., ЦНИИ “Электроника”, 1987.*

Поступила 16.08.2000

Summary

Microwave plasma discharge applications in manufacturing of microelectronic products are reviewed. Some characteristics and material treatment conditions with microwave discharge technologies are considered.

В.Ф. Соколов, Ю.А. Соколова, Д.В. Мартынов, М.А. Александров

РАСЧЕТ СКОРОСТЕЙ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ ПРИ АКТИВИРОВАНИИ ВТОРИЧНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ЭМИТТЕРОВ

*Ивановский государственный химико-технологический университет,
пр. Ф. Энгельса, 7, г. Иваново, 153460, Россия*

Важнейшим условием стабильной работы вторичных электронных умножителей со сплавными динодами из магниевой и бериллиевой бронзы является оптимизация процесса активирования динодов, который состоит в прогреве исходного сплава в окислительной среде. Параметрами такого процесса являются температурный режим, время прогрева, состав и давление остаточных газов. В ходе термической обработки динодов возможно протекание целого ряда процессов: диффузия легкой компоненты сплава на поверхность; встречная диффузия окислителя в сплаве, реакции окисления магния и бериллия на поверхности образующегося оксида, в его толще и в объеме сплава; испарение легкой компоненты с поверхности слоя оксида. При этом испаряющийся металл может попадать на изоляцию между динодами и вызывать утечки тока, что снижает коэффициент усиления ВЭУ. Такое явление наблюдалось нами ранее в работе [1]. С целью предотвращения этого эффекта необходимо проводить процесс активирования таким образом, чтобы весь металл, появившийся на поверхности динода в результате диффузии из глубины сплава был полностью окислен, а для определения условий, позволяющих достичь этого результата, необходимо иметь сведения о скоростях диффузии и окисления магния и бериллия в процессе активирования. Настоящая работа посвящена получению таких данных.

Число атомов металла, продиффундировавших через единицу поверхности сплава за время τ , рассчитывалось из выражения

$$S = 2C_0 \sqrt{\frac{D\tau}{\pi}}, \quad (1)$$

где C_0 – начальная концентрация атомов металла в объеме; D – коэффициент диффузии.

Выражение (1) представляет собой решение уравнения Фика

$$D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = \frac{\partial C}{\partial \tau} \quad (2)$$

При граничных условиях

$$C|_{x \leq 0} = 0 \quad C|_{x=0} = const$$

и начальных условиях

$$C|_{\tau=\tau_0} = C_0 \quad (3)$$

Коэффициент диффузии определяется выражением

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \quad (4)$$

где D_0 – коэффициент диффузии при бесконечно большой температуре, E – энергия активации.

Следует отметить, что в литературе имеется очень мало данных, необходимых для расчетов скоростей диффузии в металлах и сплавах. Для диффузии магния в бронзе CuAlMg в интервале температур 400–500°C нами использованы наиболее надежные значения $D_0 = 1,25 \cdot 10^{-1} \text{ см}^2/\text{с}$ и $E = 134,6 \text{ кДж/моль}$, взятые из работы [2]. Расчет проводился для температур 410–450°C и временах активирования до 14 час при содержании магния в сплаве 1–4 %, которое определяло начальную концентрацию C_0 . Такие параметры соответствуют активированию вторичных электронных умножителей по стандартной технологии; прогрев динодов в этом случае проводится при давлении остаточных газов 10^{-4} – 10^{-3} Па. Скорость диффузии магния выражали через толщину образующегося на поверхности оксида магния с учетом соотношения удельных весов оксида и металла в предположении его полного окисления. Полученные результаты для четырех значений температур и содержания магния в сплаве 1 и 3 % представлены на рис.1.

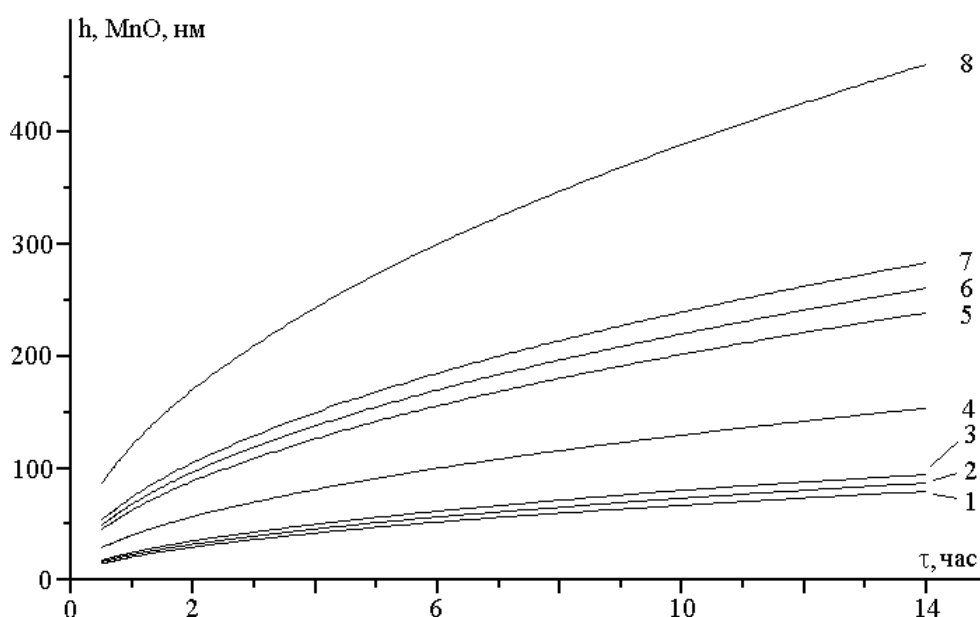


Рис. 1. Скорость образования пленки оксида магния в процессе диффузии (1–4) – 1 % Mg, (5–8) – 3 % Mg, 1, 5 – 410°C, 2, 6 – 415°C, 3, 7 – 420°C, 4, 8 – 450°C.

Для соблюдения условия полного окисления магния необходимо, чтобы скорость окисления была по крайней мере равна скорости диффузии. Окисление металла, находящегося в твердом состоянии, в основном определяется строением оксидной фазы и диффузией кислорода через окисную пленку и может протекать по линейному, параболическому или логарифмическому законам [3]. Наиболее изучен механизм окисления магния в кислороде, хотя и здесь возникают сложности, связанные с отсутствием необходимых данных для расчета. Эмпирическим путем установлено, что при давлениях меньше 1,33 Па и температурах 400 – 450°C процесс окисления магния идет по линейному закону [3, 4]

$$\Delta m = K \tau, \quad (5)$$

где τ – время окисления, Δm – приращение массы, K – константа, характеризующая металл и его оксид и являющаяся функцией температуры и давления окисляющей среды. Константа скорости окисления магния кислородом определяется выражением

$$K = A \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right), \quad (6)$$

где по данным [3, 4] для магния $A = 1,7 \cdot 10^6 \text{ г/см}^2 \text{ с}$; $Q = 211090 \text{ Дж/г атом}$, R – универсальная газовая постоянная.

Зависимость K от давления при линейном законе окисления невелика и ею обычно пренебрегают.

Для удобства сравнения результатов расчета с данными по диффузии магния на поверхность сплава скорость окисления пересчитывалась на толщину пленки оксида через атомные веса магния и кислорода и плотность металла.

На рис. 2 скорости диффузии и окисления магния сравниваются между собой для температур 420 и 450 °С при содержании магния в сплаве 1 и 2 %. Из рис.2 видно, что в первые 5 часов активирования при температуре 450 °С и в первые 9 час при 420 °С скорость образования пленки MgO за счет диффузии атомов магния на поверхность в предположении его полного окисления существенно превышает скорость образования пленки в остаточных газах за счет взаимодействия с магнием окислителя в процессе диффузии его сквозь слой оксида. Для обеспечения полного окисления магния с поверхности необходим избыток кислорода в процессе активирования. Чтобы определить необходимое для этого давление кислорода, поступали следующим образом.

Скорость прибытия молекул газа – окислителя на поверхность сплава из газовой фазы зависит от температуры T , давления P и молекулярного веса M окисляющего газа.

$$R = 10^{22} \frac{P [\text{мм.рт.ст.}]}{\sqrt{M \cdot T}} \quad (7)$$

Такие величины рассчитаны для давления кислорода ($1,33 \cdot 10^{-4}$ – 133,3 Па) и температур 410 – 450°С. На рис. 3 сравниваются между собой следующие величины: число молекул окислителя R' , подводимых из газовой фазы к поверхности сплава за время τ , вычисленное из скорости R ; число атомов магния S , диффундирующих на поверхность сплава за время τ ; рассчитанное из выражения (1); число окисленных атомов магния S' за время τ , оцененное по скорости окисления из рис. 2.

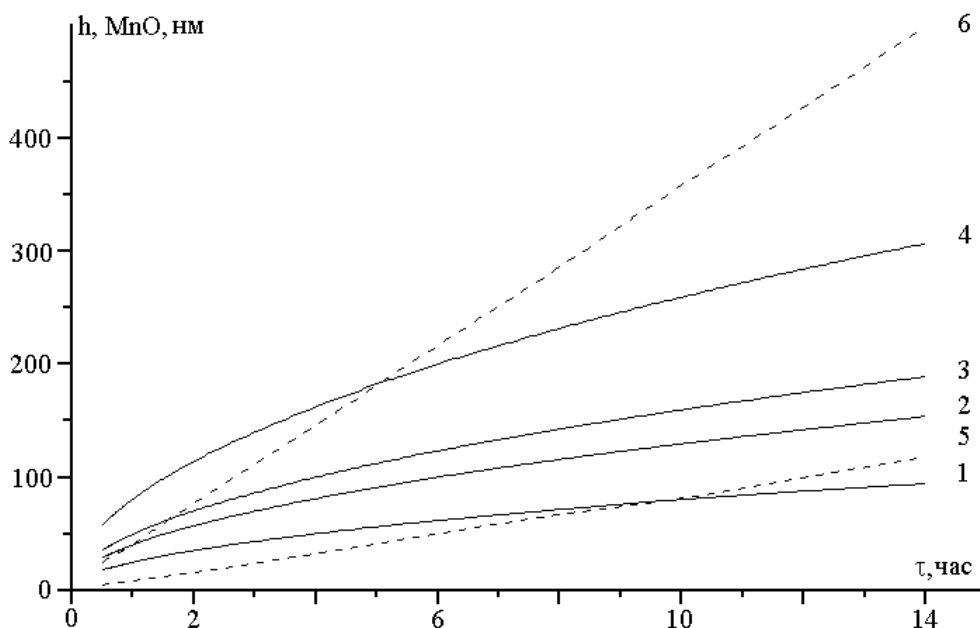


Рис. 2. Сравнение скоростей диффузии и окисления магния (1–4) – диффузия 5, 6 – окисление; 1, 5 – 420°С, 2, 4, 6 – 450°С, 1, 2 – 1 % Mg, 3, 4 – 2 % Mg.

Все эти величины отнесены к единице поверхности сплава и представлены на рис. 3 для двух температур – 420 и 450°С. Из рис. 3,а видно, что хотя, казалось бы, уже при $P = 1,33 \cdot 10^{-3}$ Па подводимых молекул окислителя должно хватать для образования MgO, реальная скорость окисления при температуре 420°С оказывается значительно ниже при всех временах активирования и заданных количествах магния в сплаве. Таким образом, для обеспечения полного окисления магния необходима подача кислорода при давлении порядка $1,33 \cdot 10^{-2}$ Па практически на всем протяжении прогрева сплава. Однако при этом наряду с образованием MgO может происходить окисление меди и появляются участки со слишком толстым слоем оксида; при обстреле их электронами возникает отрицательный заряд на поверхности, что может приводить к искажению распределения потенциала в

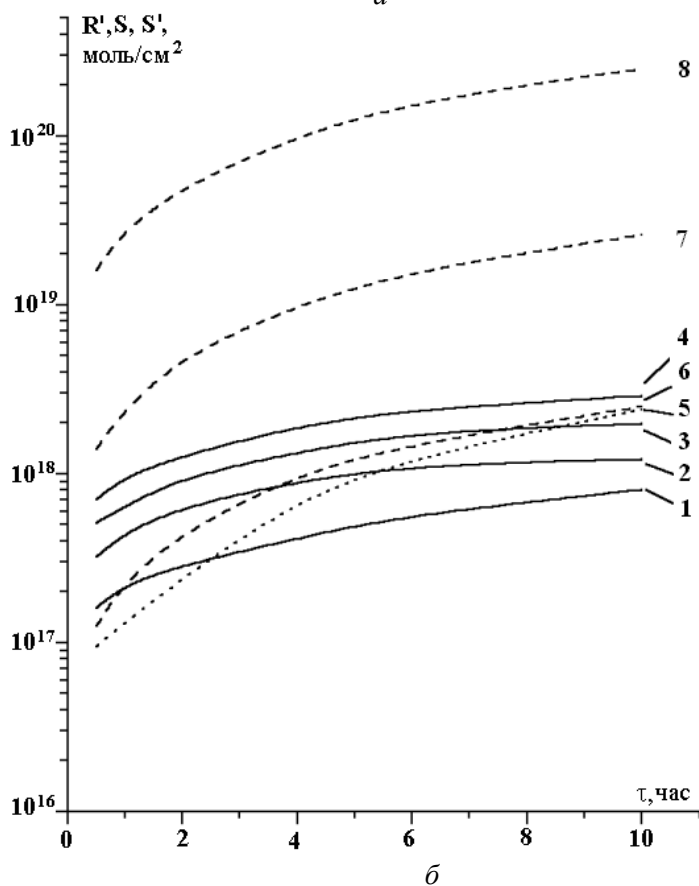
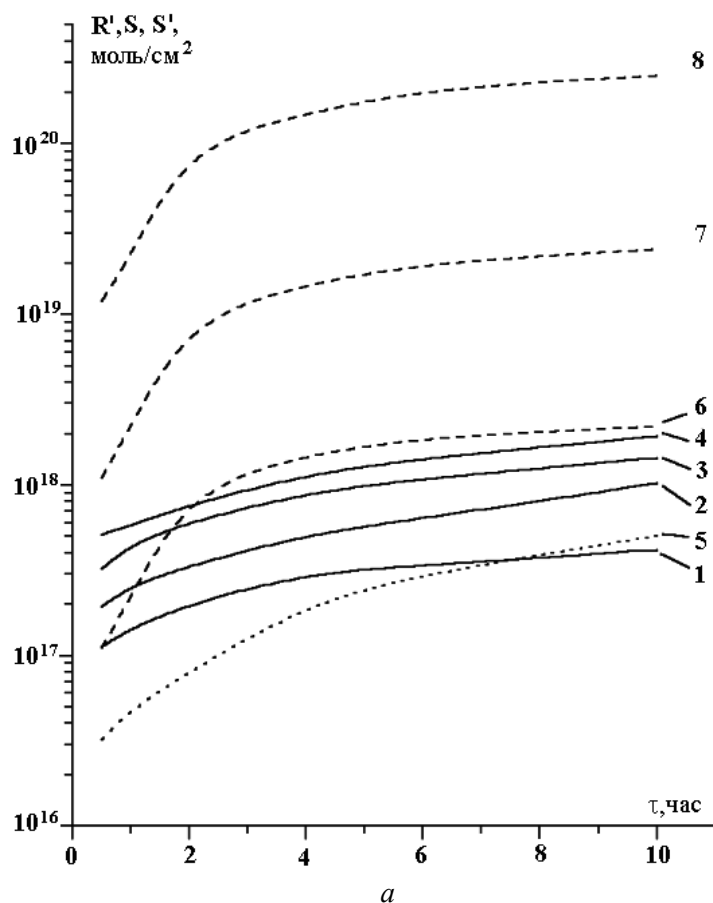


Рис. 3. Сравнение количества атомов магния, диффундирующих на поверхность, с количеством окисленных атомов и молекул окислителя, подводимых к поверхности сплава: а – 420°С, б – 450°С (1–4) – скорость диффузии, 1 – 1% Mg, 2 – 2% Mg, 3 – 3% Mg, 4 – 4% Mg, 5 – скорость окисления, (6–8) – скорость подвода молекул кислорода 6 – $1,33 \cdot 10^{-4}$ Па, 7 – $1,33 \cdot 10^{-3}$ Па, 8 – $1,33 \cdot 10^{-2}$ Па.

приборе. Кроме того, избыточный кислород может окислить весь необходимый "сверхстехиометрический" магний, содержащийся внутри слоя и обеспечивающий его полупроводниковые свойства. Поэтому добавлять избыток кислорода желательно лишь на начальном этапе, а затем следует проводить активирование в остаточных газах. Такой процесс можно осуществить при температуре 450°C и использовании сплава с содержанием магния 1–2%, поскольку здесь диффузия преобладает над окислением лишь в первые 3–5 часов активирования (рис. 3,б).

Расчеты скорости диффузии и окисления бериллия проводились при следующих параметрах процесса активирования: температура 750, 850, 950°C, время 15–120 мин, содержание бериллия в бронзе 1–4%. Для бериллия ситуация с литературными данными, необходимыми для расчетов, еще хуже, чем для магния. Мы использовали данные, приведенные в [5] для диффузии бериллия в чистой меди: $D_0 = 2,32 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2/\text{с}$, $Q = 117,04 \text{ кДж/моль}$. Рассчитанные скорости диффузии, выраженные через толщину образующейся пленки BeO , показаны на рис. 4. Вид полученных зависимостей, как и в случае магния, типичен для процесса диффузии. Что касается окисления, то в отличие от магния процесс окисления бериллия идет по параболическому закону [3]

$$7 \Delta m^2 = K_p \tau, \quad (8)$$

где K_p – константа скорости окисления; τ – время проведения процесса.

Опытным путем установлено, что если выразить константу A в уравнении Аррениуса (6) через увеличение толщины пленки оксида, то K_p подчиняется уравнению

$$K_p = 0,058 \exp \left[-\frac{259160}{RT} \right], \quad (9)$$

где энергия активации выражена в Дж/моль.

Рассчитанные скорости окисления приведены на рис. 4, откуда видно, что при температуре 850°C и концентрации бериллия в сплаве 1–2% за время 1,5–2 часа можно достичь полного окисления бериллия и получить заданную толщину оксидной пленки порядка 100–300 нм.

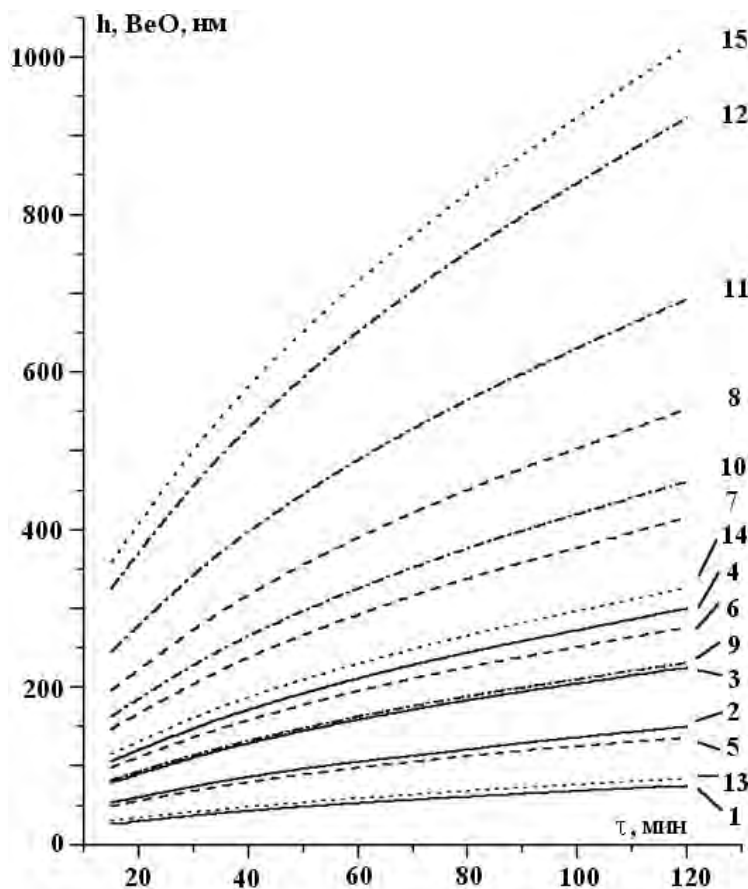


Рис. 4. Сравнение скоростей диффузии и окисления бериллия: (1–12) – диффузия, (13–15) – окисление; 1, 5, 9 – 1% Be, 2, 6, 10 – 2% Be, 3, 7, 11 – 3% Be, 4, 8, 12 – 4% Be; (1–4, 13) – 750°C, (5–8, 14) – 850°C, (9–12, 15) – 950°C.

Нами был измерен коэффициент вторичной эмиссии ВЭУ с диодами из магниевой бронзы после их прогрева в остаточных газах и в условиях дополнительной подачи кислорода на начальном этапе активирования. Для вакуумной обработки макетов ВЭУ использовался модифицированный откачной пост КРИОП-3000 с форвакуумным насосом ВН-461-М и магниторазрядным насосом НМД-0,063. Давление остаточных газов измерялось вакуумметром ВИТ-3, состав газовой атмосферы контролировался омегатронным масс-спектрометром ИПДО-1. Для испытания электрических параметров ВЭУ использовался источник высокого напряжения из состава управляющей стойки, позволяющий получать напряжения от 2,2 до 2,8 кВ при токе нагрузки до 1 мА. Напряжение на диоды подавалось с помощью делителя, собранного из сопротивлений по 3 МОм. Ток первого диода измерялся электрометрическим усилителем У1-2. Выходной ток ВЭУ измерялся усилителем постоянного тока Ф-195. Коэффициент вторичной эмиссии рассчитывался по известной зависимости

$$\frac{I}{I_0} = \sigma^n, \quad (10)$$

где I_0 – ток, подаваемый на первый диод ВЭУ; I – ток, измеряемый на последнем диоде; σ – коэффициент вторичной эмиссии; n – количество диодов (в нашем случае равно 10).

Полученные нами значения коэффициента усиления составили для макетов, обработанных в остаточных газах, $5,0 \cdot 10^3$ и $4,1 \cdot 10^4$, а для прибора с добавлением кислорода $1,0 \cdot 10^6$. Эти данные соответствуют величине σ , равной 1,6; 1,8 и 4,0. Таким образом, введение избытка кислорода в процессе активирования может приводить к увеличению коэффициента вторичной эмиссии в 2,2–2,5 раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Соколов В.Ф., Соколова Ю.А., Рыбина О.А., Бауткина Л.А. Исследование процесса активировки вторичных электронных эмиттеров // Тезисы докладов 3-й Харьковской вакуумной конференции совместно с Семинаром – совещанием "Системы откачки ускорителей и термоядерных реакторов", Харьков, 1993.
2. Лепешинская В.Н., Борисов В.Л., Перченко Г.М. Вторично-эмиссионные характеристики эффективных эмиттеров на основе сплавов в широком диапазоне первичных электронов // Радиотехника и электроника. 1960. Т. 5. Вып. 10. С. 1636–1642.
3. Туровцева З.М., Кунин Л.Л. Анализ газов в металлах. М.-Л., 1959.
4. Эйдензон М.А. Магний / Учебник для вузов. М., 1969.
5. Папиров И.И., Тихинский Т.Ф. Физическое металловедение бериллия. М., 1968.

Поступила 10.011.2000

Summary

The activation procedure of secondary electron emitters with alloyed bronze electrodes containing Mg and Be is studied. Diffusion and oxidation velocities of these metals during alloy heat treatment at low residual gas pressure are calculated. The procedure of oxygen adding is proposed to increase secondary electron emission coefficient.

ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТОИМПЕДАНСА АМОРФНОГО МИКРОПРОВОДА

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

1. Открытие явления гигантского магнитоимпеданса (ГМИ) в аморфных металлах [1] вызвало интерес теоретиков, экспериментаторов и разработчиков магнитных сенсоров. Исследования, выполненные с использованием проводов, которые были сделаны по технологии фирмы “Unitika LTD”, позволили судить о перспективности создания датчиков магнитного поля на их основе [2]. Проведенные нами исследования явления ГМИ в литом аморфном микропроводе позволили открыть тензо-ГМИ эффект [3]. В [4] предложена теория ферромагнитного резонанса в поперечной магнитной структуре с замыкающими магнитными доменами на поверхности металлической жилы. В данной работе исследована зависимость частоты ГМИ резонанса от подмагничивающего провод постоянного магнитного поля (методика исследования приведена в работах [1, 2]). Полученные результаты будем интерпретировать в рамках модели работы [4]. ГМИ резонанс позволяет проводить измерения в процессе литья микропровода.

2. Приведем полученные нами экспериментальные результаты. Установлено, что явление ГМИ наблюдается в аморфном литом микропроводе с отрицательной магнитоотрицательностью. Кривая гистерезиса характеризуется полем H_k , [4–6], при котором основные поперечные к оси провода домены развернутся вдоль поля H . Поле H_i , при котором имеет место максимум импеданса, близко к H_k , но всегда меньше H_k . Отношение H_i/H_k зависит от частоты переменного поля, и данная зависимость – линейная. При нагревании микропровода до температуры 200 °С ГМИ резонанс сильно уширялся в отличие от ФМР резонансов, которые уширяются только при температурах, близких к температурам Кюри (для наших образцов около 400 °С). Если провести термообработку (15 мин при 200 °С), то после охлаждения их резонансная кривая не была существенно уширена. Изменялся только наклон линейной функции H_i/H_k от частоты.

3. Экспериментальные результаты можно объяснить следующим образом. Используем для резонансной частоты $\dot{\omega}$ замыкающего домена формулу из [5]:

$$\dot{\omega} = \gamma (H_i + \Delta NM), \quad (1)$$

где $\gamma = 2\pi \cdot 2,8$ МГц/Э, $\Delta N = (N_{\perp} - N_{\parallel}) + K/M^2$, $N_{\perp} - N_{\parallel}$ – разность поперечного и продольного размагничивающих факторов замыкающего домена; K – энергия анизотропии; M – максимальная намагниченность.

Рассмотрим случай, когда энергия анизотропии больше энергии разности размагничивающих факторов. Для практического применения микропровода важной характеристикой является продольная магнитная проницаемость – μ , которая в нашем случае определяется

$$\mu = 4\pi M / H_k. \quad (2)$$

С другой стороны из [6]

$$\mu = M^2 / \lambda \sigma, \quad (3)$$

где λ – магнитоотрицательность, σ – внутренние напряжения в жиле.

Считая, что энергия анизотропии должна быть пропорциональна $\lambda \sigma$, получим

$$\mu \approx M / (\dot{\omega} / \gamma - H_i). \quad (4)$$

Приведенная формула позволяет оценить дисперсию продольной магнитной проницаемости из величин, измеряемых в ГМИ резонансе.

Основным результатом работы является полученная зависимость частоты резонанса ГМИ эффекта от величины постоянного магнитного поля и оценка продольной магнитной проницаемости. Таким образом, предлагается простой метод измерения высокочастотной проницаемости путем нахождения частоты ГМИ резонанса и напряженности постоянного магнитного поля H_0 , измерения которых можно проводить в процессе литья микропровода.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Makhotkin V.E., Shurukhin B.P., Lopatin V.A., Marchukov P.Yu., Levin Yu.K.* Magnetic field sensors based on amorphous ribbons // *Sensors & Actuators*. 1991. 25–27. P. 759–762.
2. *Антонов А.С., Гадецкий С.Н., Грановский А.Б. и др.* Гигантский магнитоимпеданс в аморфных и нанокристаллических мультислоях // *ФММ*. 1997. Т. 83 (6). С. 60–71.
3. *Antonenko A.N., Baranov S.A., Larin V.S., Torcunov A.V.* Giant magneto and piezo impedance in cast amorphous microwires covered by glass insulation // *Digests of INTERMAG – 96*, (Seattle), April 9–12, 1996. P. FR11.
4. *Baranov S.A.* Giant magneto-impedance effect in cast CoMnBSi amorphous microwire covered by glass insulation // *Proceeding Moscow Internal Symposium on Magnetism*. 1999. (MISM 99). P. 264–266.
5. *Ферромагнитный резонанс / Под ред. С.В. Вонсовского.* М., 1961.
6. *Torcunov A.V., Baranov S.A., Larin V.S.* The internal stresses dependence of the magnetic properties of cast amorphous microwires covered with glass insulation // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials (JMMM)*. 1999. V. 196–197. P. 835–836.

Поступила 09.10.2001

Summary

The magneto permeability cast amorphous microwires is studied by the magneto impedance measurement method.

ЛЮДИ НАУКИ

ЮРИЙ НИКОЛАЕВИЧ ПЕТРОВ



Академик АНМ Ю.Н. Петров родился 24 июня 1921 г. в г. Лбищенске (впоследствии г. Чапаев) Казахстана в семье рабочего-железнодорожника. В 1944 году окончил Московское высшее техническое училище им. Н.Э. Баумана. В годы войны Юрий Николаевич работал инженером на одном из оборонных заводов г. Ленинграда.

В 1946 году поступает в аспирантуру Ленинградского института механизации сельского хозяйства; научным руководителем, оказавшим определяющее влияние на его дальнейший жизненный путь как исследователя и педагога, был видный представитель ленинградской школы электрохимиков-технологов профессор В.И. Казарцев. Кандидатская диссертация инженера Ю. Петрова “Исследование процесса железнения применительно к ремонту автотракторных

деталей”, успешно защищенная в 1949 году, была попыткой найти условия, при которых процесс железнения (вернее, осталивания) мог бы удовлетворять широким требованиям ремонтной практики, как процесс восстановления изношенных автотракторных деталей.

Решению этих проблем (разработках и совершенствованию технологий восстановления и упрочнения поверхностей) посвящена значительная часть научной деятельности Ю.Н. Петрова.

С 1949 по 1959 год Ю.Н. Петров заведует кафедрой ремонта машин Таджикского сельскохозяйственного института, где продолжает исследования, начатые в аспирантуре и которые завершаются защитой в 1959 году докторской диссертации. В дальнейшем вся жизнь и деятельность Ю.Н. Петрова была связана с Молдовой.

С 60-х годов начинается активная работа Ю.Н. Петрова в Академии наук Молдовы. Он организует и возглавляет Лабораторию электрохимической обработки металлов, а впоследствии – Отдел проблем прочности и долговечности деталей машин Института прикладной физики.

Более 30 лет Ю.Н. Петров возглавлял кафедру “Ремонт машин” Кишиневского сельскохозяйственного института (ныне – Аграрный университет) и отраслевую научно-исследовательскую лабораторию при этой кафедре. В 1961 году Ю.Н. Петров

избран членом-корреспондентом, а в 1970 году – действительным членом Академии наук Молдовы.

Ю.Н. Петров принадлежит к исследователям ленинградской (санкт-петербургской) школы электрохимиков-технологов, основанной академиком Б.С. Якоби. Сильное влияние на Ю.Н. Петрова оказали важнейшие представители этой школы – Н.П. Федотьев, В.П. Машовец, В.И. Казарцев, для которой характерно, прежде всего, сочетание решения научных и прикладных задач в комплексе.

Основные направления научных исследований и разработок, выполненных академиком Ю.Н. Петровым и учениками, включают: совершенствование электролитов железнения, обеспечивающих управление физико-механическими свойствами покрытий и повышение износостойкости; дислокационные механизмы управления физико-механическими свойствами покрытий при электрокристаллизации; оптимизацию электроосаждения использованием импульсных режимов электролиза; управление физико-механическими свойствами поверхности, получением электрохимических композиционных покрытий; взаимосвязь между кинетическими особенностями высокоскоростных электродных процессов и технологическими параметрами электрохимической размерной обработки; методы повышения точности формообразования при электрохимической размерной обработке металлов (электролиты, импульсные режимы ЭХРО и т.д.).

Академик Ю.Н. Петров автор ряда монографий по электрохимической обработке металлов, гальваническим покрытиям при восстановлении деталей, учебника для высших учебных заведений “Основы ремонта машин” (М. “Колос”. 1972).

Есть все основания утверждать, что созданная академиком Ю.Н. Петровым в Молдавии школа электрохимиков-технологов оказалась заметным явлением в советской и постсоветской науке. Под руководством академика Ю.Н. Петрова подготовлено более 100 научных сотрудников высшей квалификации (докторов наук), в том числе 12 докторов-хабилитат технических и химических наук. Отличительные особенности школы Ю.Н. Петрова – широта подхода к изучаемым явлениям, постоянное стремление к практическому использованию результатов исследований, бережное отношение к подготовке научных и инженерных кадров. Была создана передовая (по тому времени) материально-техническая база для учебной и научно-исследовательской работы в Академии наук Молдовы, Кишиневском сельскохозяйственном институте. Большую работу проводил Ю.Н. Петров, являясь членом редколлегии журнала “Электронная обработка материалов”.

Светлая память о Ю.Н. Петрове – ученом, гражданине, наставнике молодежи навсегда сохранится в сердцах его учеников, коллег и многочисленных друзей.

Коллеги