

УДК 621.78

В.В. Крайнов<sup>1</sup>, Н.М. Тудакова<sup>1</sup>, И.Н. Фролова<sup>2</sup>

## ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ

Нижегородский государственный технический университет им.Р.Е. Алексеева<sup>1</sup>  
ОАО ПКО «Теплообменник»<sup>2</sup>

Рассмотрены вопросы технологии производства волноводной техники СВЧ и предложен новый вариант обработки волноводов методом электроплазменной обработки. Показан результат обработки электроплазменным способом, влияющим на КПД волновода.

*Ключевые слова:* СВЧ волновод, токнесущая поверхность, удельное сопротивление, шероховатость, коэффициент поглощения, электроплазменная обработка.

Наличие потерь в линии передач СВЧ-энергии при передаче высоких и средних мощностей приводит к разогреву линии, а при передаче весьма малых мощностей собственные шумы линии, обуславливающие потери, становятся соизмеримыми с полезным сигналом. Токи СВЧ во время передачи сосредоточены в поверхностных слоях проводника. Собственные потери устройств определяются свойствами поверхностного слоя металла, определяемого глубиной проникновения СВЧ-тока вследствие поверхностного эффекта. Потери энергии зависят от качества обработки рабочих поверхностей, т.е. от шероховатости поверхности. С уменьшением шероховатости токнесущей поверхности глубина проникновения СВЧ-тока уменьшается и становится соизмеримой с микронеровностями поверхности металла. В настоящее время существует тенденция к увеличению частоты СВЧ-тока с целью уменьшения массы изделий и увеличения КПД передающих устройств. Поэтому требования к качеству токопроводящей поверхности возрастают.

Волноводы СВЧ представляют собой металлическую трубу различного сечения (круглые, прямоугольного сечения, Н- и П-образные), с прикрепленными по краям фланцами. Продольное сечение волноводов также может быть различным в зависимости от назначения волноводного тракта. Длина каждой секции волноводного тракта зависит от серийности производства. На большие серии имеется возможность протягивать металл в необходимый профиль на значительную длину (4-6 м) и в дальнейшем резать его или состыковывать в зависимости от конструктивных особенностей волноводного тракта. Для малых серий волноводные секции изготавливают из пруткового металла подходящего диаметра, и длина секции, как правило, определяется возможностями инструмента, оборудования и технологии. В этом случае профиль волновода, как правило, круглый.

Для работы в сантиметровом и миллиметровом диапазоне в волноводе СВЧ работает тонкий слой внутренней поверхности. Токи СВЧ распространяются по внутренней поверхности волновода волнами, скачкообразно, врезаясь и отражаясь от поверхности волновода и, в зависимости от длины волны, проникают в поверхность на доли миллиметра. Каждый такой «скачок» несет потерю энергии, которая зависит от количества поперечных стыков данного волноводного тракта, или поперечных рисок на внутренней (рабочей) поверхности волновода. В этом случае происходит поглощение энергии СВЧ-тока.

Коэффициент поглощения энергии  $P$  поверхностью определяет одну из главных характеристик волновода - его КПД. Для данного чистого материала для каждой частоты рассчитывается теоретическое значение коэффициента поглощения  $P_{\text{расчетное}}$ . Это значение используется для сравнения с реальным значением коэффициента поглощения  $P$  конкретной поверхности и материала. Чем меньше поглощение у данной поверхности, чем ближе коэффициент поглощения  $P$  к расчетному значению  $P_{\text{расчетное}}$ , тем больше значение КПД.

Очень важными параметрами, влияющими на потерю энергии в рабочем поверхностном слое и на КПД волновода, являются:

- удельное сопротивление материала волновода;
- шероховатость поверхности.

Коэффициент поглощения электромагнитных волн поверхностью находится в прямой зависимости от удельного сопротивления материала: чем меньше удельное сопротивление, тем меньше поглощение, тем ниже коэффициент поглощения. Речь идет о сантиметровом и менее диапазоне волн. Поэтому исследование на коэффициент поглощения проводится на частоте 100-200 ГГц.

Для увеличения КПД для волноводов используют материалы с низким удельным сопротивлением (серебро, золото, медь, алюминий и их сплавы). Серебро и золото используют исключительно для покрытия внутренней рабочей поверхности из меди и алюминия и их сплавов. Это позволяет уменьшить потери при прохождении волновой энергии через волновод и предохраняет рабочую поверхность от окисления. Наиболее используемыми материалами для волноводов СВЧ являются алюминий и медь и их сплавы. Несмотря на высокие показатели алюминия по стоимости, весу и обрабатываемости, медь можно использовать в вакуумных конструкциях, что ставит ее на уровень универсальных материалов. Однако у меди имеются и недостатки, обусловленные ее свойствами. Удельная проводимость меди весьма чувствительна к наличию примесей. Так, при содержании в меди 0,5% примесей цинка, кадмия и серебра, ее удельная проводимость снижается на 5%. При том же содержании никеля, олова или алюминия удельная проводимость меди падает на 25 – 40%. Еще более сильное влияние оказывают примеси бериллия, мышьяка, железа, кремния или фосфора, снижающие удельную проводимость на 55%. В то же время присадки металлов повышают механическую прочность и твердость меди. Недостатком меди является ее подверженность атмосферной коррозии с образованием оксидных и сульфидных пленок. Вследствие окисления медь непригодна для слаботочных контактов. Металлическое отслаивание и термическое разложение оксидной пленки вызывает повышенный износ медных контактов при сильных токах. Значительное влияние на механические свойства меди оказывает водород, легко проникающий вглубь металла при повышенных температурах. Давление образующегося в металле водяного пара из-за незначительной скорости его диффузии может достигать нескольких тысяч атмосфер. Это приводит к образованию микротрещин, нарушающих плотность материала и придающих ему хрупкость и ломкость. В производстве это явление называют водородной болезнью.

Как показывает практика, шероховатость рабочей (токонесущей) поверхности также значительно влияет на КПД волноводного элемента – чем ниже шероховатость, тем ниже коэффициент поглощения и выше КПД.

Для производства волноводов используются различные способы обработки, при которых получается различная шероховатость. В табл. 1 рассмотрены способы обработки медных и алюминиевых волноводов, которые при технологических особенностях (различные режимы резания, геометрии инструмента, технологической оснастки) дают сходные классы чистоты.

Анализируя табл. 1, можно сделать вывод о том, что обработка наружных поверхностей проводится на один класс чище, чем обработка внутренних (сравнение точения и растачивания). В СТП предприятий, изготавливающих волноводную технику, для рабочих (токонесущих) поверхностей волновода чистота поверхности имеет требование по 7-8 классу. Изготовление более гладких (до Ra 0,2 мкм) внутренних цилиндрических поверхностей из меди и алюминия требует доводочных операций, что достаточно трудоемко и затратно в производстве. Поэтому поиск эффективных «объемных» технологий для достижения более высоких классов шероховатости для меди и алюминия является актуальным для многих производителей волноводной техники.

Одна из таких эффективных «объемных» технологий имеет все основания для эффективного использования в производстве волноводной техники СВЧ. Это электроплазменная обработка (ЭПО) металлов.

Сущность процесса электроплазменной обработки заключается в следующем. В электролитической ячейке при напряжении более 90 В вокруг активного электрода образуется парогазовая оболочка толщиной  $10^{-5}$  м, через которую протекают электроразряды, обеспечивающие нагрев поверхности детали со скоростью до 500 град/с с максимальной удельной плотностью  $10^3$ - $10^4$  Вт/см<sup>3</sup>.

Таблица 1

Классы чистоты для разных способов обработки медных и алюминиевых волноводов

Способ обработки		Класс чистоты с параметрами R <sub>a</sub> (мкм)													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
		50	25	12,5	6,3	3,2	1,6	0,8	0,4	0,2	0,1	0,05	0,025	0,012	0,006
Литье по выплавляемым								x	x						
Литье под давлением										x	x				
Порошковая металлургия									x						
Сверление				x	x	x									
Строгание						x	x								
Точение	Чистовое						x	x							
	Тонкое								x						
Растачивание	Чистовое					x	x								
	Тонкое							x							
Развертывание	Чистовое						x	x							
	Тонкое								x						
Фрезерование	Чистовое				x	x									
	Тонкое						x	x							
Шлифование	Чистовое							x	x						
	Тонкое									x					
Протягивание	Чистовое							x	x						
	Тонкое									x	x				
Доработка твердым сплавом	Предвар.									x					
	Чистовая										x	x			
Суперфиниш	Чистовое									x	x				
	тонкое											x	x		
Анодно-механическая обработка	Предвар.						x								
	Чистовая							x	x						
Притирка											x	x	x		
Полирование													x		
Полирование химическое										x					
Точение алмазное													x		

Для тестирования электроплазменной установки (ЭПУ) по достижению шероховатости Ra 0,2 мкм для меди и алюминия были отобраны три материала: медь МЗ, алюминиевый сплав Д16Т, сталь 12Х18Н10Т (по 10 образцов каждого). Торцовые поверхности всех 10 образцов предварительно обрабатывались на токарном станке 16К20 до шероховатости Ra 0,8 мкм. Затем по пять образцов каждого материала были обработаны на электроплазменной установке.

Условия обработки на ЭПУ для всех образцов были одинаковые:

Рабочее напряжение (В)..... более 100  
 Рабочая плотность тока (А/см<sup>3</sup>).....0,15 – 1,5  
 Время обработки (мин).....1-10  
 Удельные затраты энергии (кВт ч/дМЗ)....0,05 – 0,1  
 Температура электролита..... 80-90°С  
 Концентрация электролита..... до 60 г/л  
 Электролит:.....раствор NaCl.

После ЭПО образцы имели разное качество обработанной поверхности. Эти данные сведены в табл. 2.

Таблица 2

**Шероховатость Ra (мкм), образцов из разных материалов до и после ЭПО**

№ п/п	Обрабатываемый материал	Удельное сопротивление, мкОм·м	Ra, мкм	
			до обработки на ЭПУ	после обработки на ЭПУ
1	МЗ	0,018	0,7-0,8	0,4-0,8
2	Д16Т	0,073	0,7-0,8	0,7-0,8
3	12Х18Н10Т	0,75	0,7-0,8	0,1-0,2

Образцы из стали 12Х18Н10Т, в отличие от медных и дюралевых, после обработки на ЭПУ имеют ярко выраженное повышение качества поверхности. Параметр шероховатости снижается 4–5 раз, а также стабилизируется получаемый профиль шероховатости. Указанные преимущества технологии ЭПО на этих образцах были полностью подтверждены.

Для образцов из сплава Д16Т влияние обработки на ЭПУ на качество поверхностного слоя не обнаружено, да и разница в шероховатости не позволяет сделать каких-либо выводов. Для сплава Д16Т требуется другой режим обработки.

Предварительные выводы: обработка на электроплазменной установке с высокой эффективностью осуществляется для обрабатываемого материала с достаточно высоким удельным сопротивлением (св. 0,1 мкОм·м). Поэтому в основном ЭПО применяется для железосодержащих сплавов.

Отклонением от известных закономерностей стали медные образцы. Медные образцы, имеющие до ЭПО равномерный характер следов обработки на плоскости, после ЭПО имели явно неравномерную шероховатость. Наблюдалось различное по глубине оплавление отдельных участков поверхности, наиболее глубокие следы оплавления – на периферии образцов. Расположение следов обработки по площади образца также стало неравномерным. Наиболее хаотичное расположение следов оплавления также наблюдалось на периферии образца.

Такая структура поверхности может быть объяснена тем, что во время обработки на ЭПУ происходит активное окисление меди. Из-за высокой электрической проводимости меди имеет место неравномерное распределение по поверхности образцов электроразрядных явлений (интенсивность электроразрядов снижается от периферии образца к середине).

Несмотря на неравномерность обработки поверхности на медных образцах, ЭПО для данного материала оказалась весьма эффективной.

Для принятия решения об использовании обработанных на ЭПУ материалов в волноводных конструкциях необходимо было проверить у данных материалов коэффициент поглощения поверхностью электромагнитных волн в момент «скачка» и отражения волны от поверхности металла. Исследование образцов на коэффициент поглощения проводилось на частоте 140 ГГц. Полученные данные сведены в табл. 3.

Таблица 3

## Значение коэффициента поглощения поверхности до и после ЭПО

№	Материал	Удельное сопротивление, мкОм·м	Расчетное $P_{\text{расчетное}} (10^{-3})$	После станка $P (10^{-3})$	После станка + ЭПО $P (10^{-3})$
1	МЗ	0,018	1,00	1,23	1,11
2	Д16Т	0,073	1,46	2,30	2,30
3	12Х18Н10Т	0,75	6,70	8,00	7,00

Анализируя данные табл. 2 и 3, можно сделать вывод о зависимости коэффициента поглощения  $P$  от шероховатости поверхности  $Ra$  образцов: для материалов 12Х18Н10Т и Д16Т они логичны, а для МЗ получилось очень низкое значение коэффициента поглощения  $P=1,11 \cdot 10^{-3}$  при грубом значении  $Ra$ .

Сравнение ЭПО по коэффициенту поглощения с другими методами обработки меди (см. табл. 1) дало следующий результат. Наиболее близкое значение с коэффициентом поглощения у ЭПО имеет обработка меди МЗ алмазным резцом:  $P=1,10 \cdot 10^{-3}$ . Однако, не смотря на практически одинаковые коэффициенты поглощения у ЭПО и обработки алмазным резцом ( $P=1,11 \cdot 10^{-3}$  и  $P=1,10 \cdot 10^{-3}$  соответственно), шероховатость образцов после ЭПО ( $Ra0,4-0,8$ ) на несколько классов ниже, чем у образца, обработанного алмазным резцом ( $Ra0,025-0,05$ ).

Таким образом, возникает вопрос о значительном уменьшении коэффициента поглощения у образцов из меди МЗ после ЭПО, в отличие от образцов из меди, обработанных другими методами.

Для более тщательного рассмотрения влияния ЭПО на качество поверхностного слоя для медных образцов был проведен анализ химического состава (табл. 4).

Таблица 4

## Химический состав медных образцов из МЗ до и после ЭПО

№	Компонент	Концентрация до ЭПО, %	Концентрация после ЭПО, %
1	Cu	99,28996	99,44865
2	AL	0,54854	0,38509
3	Si	0,05213	0,03039
4	Fe	0,04439	0,03374
5	S	0,03122	0,04032

Некоторое отклонение по количеству примесей до и после применения ЭПО не может повлиять на значительное уменьшение коэффициента поглощения, так как медь с другим количеством примесей (M0, M1, M2) при аналогичной обработке имеет аналогичное значение коэффициента поглощения.

Ответ на вопрос об аномально низком коэффициенте поглощения у меди после ЭПО дает послыжное исследование микроструктуры. В образцах после ЭПО в поверхностном слое материала (на глубине до 100 мкм), имеется значительное превышение содержания атомов натрия (Na) над атомами меди. До глубины поверхностного слоя образцов, равной значению шероховатости, количество атомов натрия в 10 раз превышает количество атомов меди, образуя защитную пленку. После достижения глубины поверхностного слоя образцов, равной значению шероховатости, на всем протяжении токонесущей поверхности количество атомов натрия сопоставимо с количеством атомов меди. Такая аномалия объясняется следующим образом. В момент электроразрядов из соляного раствора происходит выделение натрия не только на поверхность металла, но и внедрение его в поверхностный слой, при этом образуется металл-натриевый сплав (в данном случае, медно-натриевый). Проникая в кубическую

решетку меди, атом натрия, способствует созданию симметричной ионной решетки, а это приводит к снижению остаточного электрического сопротивления. Таким образом, твердый медный раствор, насыщенный натрием, в данном случае имеет более низкое, чем у чистой меди, удельное электрическое сопротивление.

Устойчивость твердого медного раствора, насыщенного натрием, полученного методом электроплазменной обработки была проверена при помощи метода отжига в водородной печи. Данный эксперимент выявил почти полное удаление натрия из поверхностного слоя медных образцов и возвращение коэффициента поглощения образца на уровень «после станка». Остальные образцы, которые не прошли отжиг в водородной печи, в течение нескольких лет не имели поверхностного окисления, сохраняя свои физические свойства, в том числе, коэффициент поглощения.

### Выводы

Метод ЭПО материалов эффективен при использовании волноводов при нормальном атмосферном давлении и открытом (закрытом) пространстве.

### Библиографический список

1. Арзамасов, Б.Н. *Материаловедение* / Б.Н. Арзамасов, В.И. Макаров, Г.Г. Мухин. – 7-е изд. – М., 2005.
2. *Справочник по электротехническим материалам*; под ред. Ю.В.Корецкого [и др.]. – 3-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 1988.

*Дата поступления  
в редакцию 02.12.2013*

V.V. Krainov<sup>1</sup>, N.M. Tudakova<sup>1</sup>, I.N Frolova<sup>2</sup>

### PECULARITIES OF EMPLOYING ELECTRIC PLASMA TREATMENT

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alexeev<sup>1</sup>,  
JSC «Теплообмёник»<sup>2</sup>

**Purpose:** The issues of the current technology of producing Ultra High Frequency (UHF) waveguide equipment are addressed; new version of waveguide treatment by method of electric plasma treatment is suggested.

**Design/methodology/approach:** This method will help to treat simultaneously all the waveguide's surfaces within 1-10 minutes. Three different materials with the same roughness, which are used in the production of UHF waveguides, are chosen. After treatment of these materials at the electric plasma unit, the surface quality of all the materials turned out to be different.

**Findings:** Copper sample's absorption factor proved to be anomalous. It considerably extends beyond the limits of the dependences of absorption factor on specific resistance and roughness factor. The reason is saturation of metallic copper's lattice with metallic sodium to such amount that this allows to establish symmetric this between the copper molecules.

**Originality/value:** This saturation allows decreasing the specific resistance of copper's surface layer and create a copper protective layer (from oxidation by oxygen).

*Key words:* UHF- treatment, specific resistance, electric plasma treatment, absorption factor.