

момент запускался секундомер. По истечении 30 секунд процесс обработки прекращался, текстолитовая пластина выводилась из контакта с бором и переустанавливалась на рычаге таким образом, чтобы на ней можно было прорезать паз другим испытуемым бором, который бы располагался от предыдущего на расстоянии не менее 5 мм.

Режущая способность бора оценивалась по значению интенсивности резания  $i$  им текстолитовой пластины, которое определялось отношением площади  $F$  полученного на ней пропила ко времени обработки  $t = 30$  с, т.е.  $i = F/t$  (мм<sup>2</sup>/с). Величина  $F$  находилась как произведение толщины пластины  $b = 1,5$  мм на глубину  $h$  полученного на ней пропила ( $F = b \times h$ ). Значение  $h$  измерялось с помощью малого инструментального микроскопа ММИ-2 с точностью  $\pm 5$  мкм.

Испытаниям подвергались боры в исходном состоянии их рабочей поверхности (новые), в ее изношенном состоянии, и боры, изношенная рабочая поверхность которых была модифицирована путем электроэрозионной обработки. Изношенная рабочая поверхность бора получалась в результате обработки новым бором образца из гранита в течение 5 мин.

Диаметральные размеры рабочей поверхности боров при трех ее состояниях измерялись с помощью микрометра МР-25-0,001.

#### Литература

1. Киселев М.Г., Дроздов А.В., Москаленко А.В., Богдан П.С. Эффективность применения электроэрозионной обработки поверхности проволочного инструмента с целью придания ей режущей способности // Вестник Полоцкого государственного университета. – 2013. – № 11. – С. 73–77.
2. Киселев М.Г., Дроздов А.В., Габец В.Л., Богдан П.С. Экспериментальная оценка режущей способности штрипс с модифицированной путем электроэрозионной обработки рабочей поверхностью // Механика машин, механизмов и материалов. – 2014. – № 3. – С. 64–68.
3. Киселев М.Г., Дроздов А.В., Богдан П.С., Сентемова Д.В. Влияние скорости вращения рабочей поверхности отрезного диска в процессе ее электроэрозионной обработки на режущую способность инструмента // Механика машин, механизмов и материалов. – 2016. – №2. – С. 58–62.

УДК 621.539

### СВЧ-ПЛАЗМОТРОН РЕЗОНАТОРНОГО ТИПА С ДИНАМИЧЕСКИМ УПРАВЛЕНИЕМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СВЧ ЭНЕРГИИ В ОБЪЕМЕ ПЛАЗМЕННОЙ КАМЕРЫ

**Бордусов С.В., Мадвейко С.И., Земляков А.С., Пронина М.И., Лушакова М.С.**

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
Минск, Республика Беларусь*

В резонаторных СВЧ-плазмотронах для получения разряда используется энергия «стоячих волн» [1]. Между двумя параллельными отражающими плоскостями (стенками резонатора) возбуждается плоская волна, распространяющаяся перпендикулярно к ним, при достижении одной из плоскостей волна полностью отражается от неё. Многократное отражение от обеих плоскостей приводит к образованию волн, распространяющихся в противоположных направлениях и интерферирующих друг с другом. Если расстояние между плоскостями кратно половине длины волны, то интерференция волн приводит к образованию стоячей волны, амплитуда которой при многократном отражении сильно возрастает, приобретая резонансные свойства [2]:

$$L = n\lambda/2, \quad (1)$$

где  $L$  – расстояние между плоскостями;  $n$  – любое целое положительное число;  $\lambda$  – длина волны.

Наличие неоднородности распределения электрического поля в объеме резонатора приводит к неравномерности нагрева образцов, помещенных в разрядной камере в резонаторе

СВЧ плазмотрона, и, следовательно, к неравномерности скоростей обработки материалов.

В целях снижения неравномерности распределения СВЧ энергии в резонаторной камере было предложено использовать вращающийся диссектор, который крепится внутри резонатора. Диссектор представляет собой несколько металлических лопастей определенной конфигурации, закрепленных на общей оси [3]. Такое техническое решение позволяет перераспределить электромагнитную энергию в объеме резонатора.

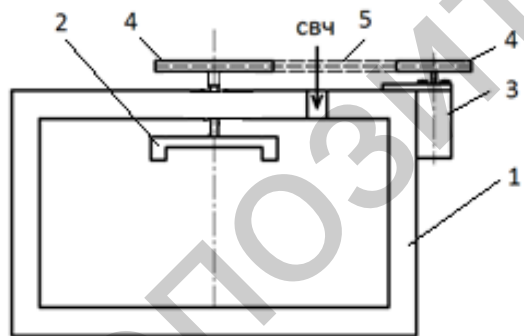
Экспериментальные исследования распределения электромагнитной энергии в разрядном объеме проводились на базе лабораторной СВЧ плазменной установки резонаторного типа (рисунок 1), которая используется для операций очистки полупроводниковых подложек, удаления фоторезистивных покрытий, лаков и мастик, плазмохимического осаждения пленок, модификации поверхности материалов, деталей и узлов сложной формы и т.д. [1, 4].



Рисунок 1 – СВЧ плазматрон резонаторного типа

Основными элементами установки являются: корпус, генератор электромагнитных колебаний, резонатор прямоугольной формы 1 с горизонтально размещенным в нем кварцевым реактором 2 на подставке 4, источник питания СВЧ магнетрона, система газоснабжения, электрооборудование с системой управления и контроля. Внутри кварцевого реактора размещается подложкодержатель 3. В качестве генератора электромагнитных колебаний использовался магнетрон М-105, величина мощности которого достигает 600 Вт и частоты – 2,45 ГГц.

Система с динамическим перераспределением СВЧ энергии в резонаторе представляет собой диссектор, вращающийся за счет передачи движения от электродвигателя с помощью шкивов и приводного ремня (рисунок 2).

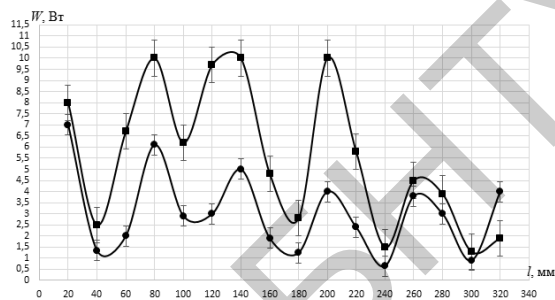


1 – резонаторная камера; 2 – диссектор;  
3 – электродвигатель; 4 – шкив;  
5 – приводной ремень

Рисунок 2 – Система с динамическим перераспределением СВЧ энергии в резонаторе

Характер распределения мощности СВЧ волны в объеме плазмы СВЧ разряда исследовался при помощи «активного зонда», который перемещался по оси кварцевой камеры СВЧ плазматрона. Показания зонда регистрировались с помощью измерителя мощности через определенные расстояния по всей длине оси разрядной камеры. В качестве измерителя мощности использовался

термисторный мост Я2М-64 – устройство для определения изменения полного сопротивления термистора при поглощении мощности высокочастотных колебаний, а, следовательно, и величины мощности. На рисунке 3 представлены зависимости зарегистрированных показаний измерителя мощности при перемещении «активного зонда» по оси кварцевой трубы СВЧ плазматрона в присутствии плазмы в кварцевой камере от расстояния от передней стенки при вращающемся и не вращающемся диссекторе.



■ – при не вращающемся диссекторе;  
● – при вращающемся диссекторе

Рисунок 3 – Зависимости зарегистрированных показаний измерителя мощности при перемещении «активного» зонда по оси кварцевой трубы СВЧ плазматрона в присутствии плазмы в кварцевой камере от расстояния от передней стенки

В ходе экспериментальных исследований было установлено, что вращение лопастей диссектора приводит к уменьшению разброса амплитуды колебаний величины СВЧ энергии по оси разрядной камеры. При вращении диссектора условия распространения для электромагнитных волн в зависимости от расположения лопастей изменяются, поэтому структура поля в камере постоянно трансформируется, что приводит к снижению неравномерности распределения электромагнитной энергии в резонаторной камере СВЧ-плазматрона.

При проведении плазменных процессов обработки в СВЧ плазматроне резонаторного типа предложенное конструктивное решение с использованием вращающейся оси с определенным профилем лопастей позволяет уменьшить неравномерность интенсивности величины СВЧ энергии в объеме разрядной камеры, что может обеспечить увеличение равномерности при обработке материалов и изделий электронной техники.

1. Бордусов, С. В. Плазменные СВЧ технологии в производстве изделий электронной техники / под ред. А. П. Достанко. – Минск.: Бестпринт, 2002. – 452 с.
2. Де Бройль Л. Электромагнитные волны в волноводах и полых резонаторах: пер. с фр.

- М.С. Головиной; под ред. В.Т. Овчарова. – М.: ИЛ, 1948. – 91 с.
3. Мирошниченко, С.П. Микроволновые печи: учебно-метод. пособие по курсу «Бытовая электроника» / С.П. Мирошниченко, В.В. Поляков // – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. – 38 с.
4. Бордусов, С.В. Конструктивные особенности установки и технологические процессы СВЧ плазменной обработки материалов в условиях низкого вакуума / С.В. Бордусов // *Материалы, технологии, инструменты.* – 2001. – Т.6, № 4. – С. 62–64.

УДК 539.3

## ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА УСАДКУ И КОРОБЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ КОМПОЗИТА

Василевич Ю.В., Неумержицкая Е.Ю.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
Минск, Республика Беларусь*

Усадка является одной из важнейших технологических и эксплуатационных характеристик материала. Точность размеров и взаимозаменяемость деталей зависят от целого комплекса причин, в котором на долю усадки и ее коробления приходится 75-80 %. Кроме того, усадка приводит к возникновению значительных внутренних напряжений, потере деталями геометрической формы, короблению, трещинам, отслаиванию футеровки и т.д. Определение усадочных характеристик имеет важное значение при конструировании и изготовлении деталей приборостроения, машиностроения, других отраслей промышленности, при конструировании формующего инструмента, оценке работоспособности и надежности конструкций, выборе марки и оценке эксплуатационных качества материала. Как правило, под усадкой понимается уменьшение объема (объемная усадка) или размеров (линейная усадка) по сравнению с размерами оформляющих деталей пресс-формы, происходящее при изготовлении изделия, а также в результате его хранения и эксплуатации. Обычно измеряют линейную усадку изделия в направлении, перпендикулярном направлению движения пуансона, так как этот размер получается наиболее точным, легко контролируется и обычно является посадочным или сопрягаемым.

Важно различать действительную и расчетную линейную усадки. Под действительной линейной усадкой понимается разность между размером одного и того же элемента детали, определенным при температуре, соответствующей началу усадки, (фактически это размер пресс-формы, нагретой до температуры прессования) и размером после полного охлаждения детали. Под расчетной линейной усадкой понимается разность между размером оформляющего элемента пресс-формы  $L_{p1}$ , измеренным при температуре 293 К, и размером соответствующего элемента детали  $L_{p2}$ , измеренным при той же температуре. Эта разность дает абсолютную величину расчетной усадки.

Выбор образцов имеет большое значение при определении влияния различных параметров на

величину усадки. Это объясняется прежде всего тем, что конфигурация образца влияет на получаемый результат, правильная оценка которого возможна лишь при наличии определенных критериев, позволяющих производить сравнение. Поэтому величины относительных расчетных усадок, определенные для одного и того же материала, но на разных образцах или деталях, колеблются в довольно широких интервалах. Правильное и точное измерение усадки деталей очень важно, достоверность получаемых результатов зависит от многих факторов. Суммарная погрешность измерения включает в себя погрешность измерительных и поверочных средств, а также погрешности из-за отклонения температуры, непостоянства измерительного усилия и деформации детали при ее извлечении из пресс-формы. ГОСТ 18616-73 предусматривает измерение усадки с помощью универсальных измерительных инструментов: штангенциркуля и микрометра. Результаты таких измерений следует рассматривать только как ориентировочные из-за неопределенности прикладываемого измерительного усилия и смещения точек измерения. Это приводит к тому, что заданный допуск размера становится одного порядка с величиной погрешности измерения.

При использовании специальных приборов и приспособлений с индикаторами часового типа точность измерения возрастает до 0,005 мм при фиксированном измерительном усилии  $2 \cdot 10^{-3}$  Н. Вследствие этого, приспособления с индикаторами широко используются в лабораторной практике и в цеховых условиях.

Усадка представляет собой сложное явление и зависит от многих факторов: технологических параметров формования, способа подготовки материала, режима охлаждения изделия после извлечения из пресс-формы, конструкции изделия и структурных параметров композиции (длины и диаметра армирующих элементов, их объемного содержания  $C_0$ , закона распределения в объеме).

Анализ влияния структурных параметров на усадку может быть осуществлен путем решения