

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАГРЕВА ВОЛЛАСТОНИТА ПРИ ВВЕДЕНИИ СВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ В ОБЪЕМ МАТРИЦЫ

К.А. Тюнин, В.В. Тильзо, Е.В. Сыпин, Г.В. Леонов

В работе описан процесс создания конечно-элементной модели нагрева волластонита в матрице пресса СВЧ излучением высокой мощности в программной среде ANSYS Multiphysics.

В настоящее время в промышленности одним из основных технологических процессов обработки материалов и изделий является термообработка. При традиционных способах термообработки нагрев изделия происходит первоначально по поверхности (контактный, конвективный и радиационный методы нагрева) [1]. При низкой теплопроводности изделия, что имеет место у диэлектрика, термообработка происходит медленно, при этом возможны локальный перегрев и подгорание поверхности нагрева, возникновение недопустимых механических напряжений.

Интенсивные и широкие исследования по использованию электрофизических методов термообработки диэлектриков показали эффективность использования для этой цели энергии электромагнитных колебаний, поскольку достигаемый объемный нагрев изделия позволяет значительно ускорить процесс термообработки по сравнению с традиционными методами нагрева, повысить качество готовых изделий, уменьшить площадь, занимаемую установкой, улучшить экономические показатели процесса.

Использование диэлектрического нагрева фрикционных композиций на стадии прессования является одним из перспективных направлений по внедрению установок диэлектрического нагрева в промышленное производство. В настоящее время нагрев формируемого изделия происходит при помощи электрических ТЭНов. Разработка и внедрение в пресс СВЧ модуля нагрева фрикционной композиции позволит улучшить технико-экономические показатели установки для формирования законченного продукта (брикетов тормозных накладок транспортных средств), а также создать более комфортные условия труда для обслуживающего персонала.

При разработке и проектировании установки диэлектрического нагрева необходимо решить в их взаимосвязи задачи электродинамики и электроники, тепломассопереноса и термомеханики, материаловедения, метрологии, измерения и контроля, конкретной техно-

логии, а также экономической эффективности применения диэлектрического нагрева для достижения заданного технологического и производственного процесса. Комплексное решение этих задач позволит выбрать оптимальные геометрические размеры, энергетические, электродинамические и теплотехнические параметры проектируемой установки. С помощью этого расчета необходимо, во-первых, убедиться в целесообразности применения установки диэлектрического нагрева для реализации заданного производства, а во-вторых, провести технико-экономическую оптимизацию структуры оборудования, позволяющего с наименьшими затратами обеспечить заданную производительность производства. Только таким образом обоснованный выбор типа и количества установок, мощности и частоты генератора электромагнитных колебаний даже при высокой стоимости установки позволяет получить значительный технический и экономический эффект.

Постановка задачи

Для создания установки для СВЧ нагрева пресс-материала на стадии прессования необходимо решить ряд специфических задач: провести эксперименты по нагреву фрикционного материала [2], рассчитать волноводную структуру для ввода СВЧ излучения в объем матрицы пресса, рассчитать электромагнитные и температурные поля в нагреваемом материале, оптимизировать структуру установки, разработать программу управления СВЧ модулем и многие другие. Наиболее эффективным способом решения части вышеперечисленных задач является создание математической модели процесса нагрева фрикционного пресс-материала, которая должна включать в себя расчеты геометрической конструкции установки, расчет электромагнитного поля внутри установки, расчет температурного поля материала на всем временном интервале нагрева с определенным шагом. В данной статье описывается первый этап создания математической

модели нагрева фрикционной накладки автомобиля "ВАЗ" (рис. 1).



Рисунок 1 – Фрикционная накладка "ВАЗ"

Выбор программного продукта для проведения процесса моделирования

Для осуществления математического моделирования существует широкий выбор программных продуктов, реализующих численные методы моделирования, как узконаправленных, так и универсальных. К таким программам относятся, например, система полного трехмерного электромагнитного моделирования XFDTD фирмы REMCOM, комплекс программ электродинамического моделирования EM Solvers фирмы Electromagnetic Consulting and Software, система полного трехмерного электромагнитного моделирования FEKO фирмы EM Software & Systems, система электромагнитного моделирования mWave Wizard фирмы MiCIAN и другие [3].

Примером универсальной программной среды является ANSYS Multiphysics фирмы ANSYS Inc. ANSYS Multiphysics - многоцелевой продукт, представляющий совокупность объединенных программных средств для анализа широкого круга инженерных дисциплин, который позволяет проводить расчетные исследования не только в таких отдельных областях знания, как прочность, распространение тепла, механика жидкостей и газов или электромагнетизм, но и решать связанные задачи. Эта программа обеспечивает оптимизацию проектных разработок на уровне, позволяющем моделировать инженерные проблемы в наиболее полной постановке.

ANSYS Multiphysics предназначен для решения в единой среде следующих задач:

- прочностной анализ;
- теплофизика;
- электромагнетизм;

- гидрогазодинамика;
- междисциплинарный связанный анализ, объединяющий все четыре типа;
- оптимизация на основе всех вышеприведенных типов анализа.

Для каждой дисциплины существует своя подпрограмма, наиболее оптимизированная для решения определенного круга задач. Для моделирования процесса диэлектрического нагрева необходимы следующие модули: «Теплофизика» (Thermal Analysis) и «Электромагнетизм» (High-Frequency Electromagnetic Analysis) [5]. Данные подпрограммы позволяют проводить следующие виды анализа:

теплофизика:

- стационарный анализ;
- нестационарный анализ;
- анализ процессов излучения тепла (радиационный);
- анализ теплопроводности;
- анализ конвекционных процессов;
- анализ процессов с фазовыми переходами в материале;

электромагнетизм:

- магнитостатика;
- низкочастотный гармонический анализ;
- электростатика;
- анализ электропроводности;
- высокочастотный модальный анализ;
- высокочастотный гармонический анализ.

Для моделирования процесса диэлектрического нагрева потребуется провести и высокочастотный гармонический нелинейный анализ и нестационарный нелинейный тепловой анализ.

К высокочастотному диапазону относятся электромагнитные колебания с частотой от сотен МГц до сотен ГГц [4]. Высокочастотный электромагнитный анализ моделирует электромагнитные явления, при которых длина волны сигнала соизмерима или меньше размеров устройства. Данный вид анализа позволяет вычислять параметры распространения электромагнитного поля и волн в заданной структуре.

Использование высокочастотного электромагнитного анализа позволяет решить внешнюю и внутреннюю краевые задачи распространения. К внутренней краевой задаче можно отнести проблемы:

- распространение электромагнитного поля в замкнутом пространстве;
- колебания в закрытых структурах, например, резонансные камеры;
- микроволновые фильтры;

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАГРЕВА ВОЛЛАСТОНИТА ПРИ ВВЕДЕНИИ СВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ В ОБЪЕМ МАТРИЦЫ

- анализ высокоскоростных микросхем;
- поиск резонансных частот;
- анализ рассеивания электромагнитного излучения.

К внешней краевой задаче можно отнести проблемы:

- излучение электромагнитной волны в открытое пространство (вакуум);
- отражение электромагнитной волны от объекта в открытом пространстве (вакуум).

Нестационарный нелинейный тепловой анализ определяет распределение температуры и «других температурных параметров», при воздействии источника тепла, изменяющегося во времени и при наличии фазовых превращениях в материале. Под «другими температурными параметрами» обычно понимаются: количество полученной или потерянной теплоты, градиент температуры, потоки тепла. Базовыми для теплового анализа являются результаты, полученные на основе принципа сохранения энергии. ANSYS использует три базовых способа передачи теплоты: теплопроводность, конвекция, радиация. В дополнение к базовым способам передачи теплоты, пользователь может добавить некоторые специальные условия, например: изменение фазы вещества (плавление или кристаллизация), выделение внутренней теплоты (горение).

Нестационарный нелинейный тепловой анализ основывается на стационарном тепловом анализе. Для определения функциональной зависимости воздействия от времени можно применить встроенный редактор формул, а затем применить данную функциональную зависимость как граничное условие; либо разделить кривую нагрузки на дискретные стационарные участки. Для каждого шага нагрузки следует определить её значение и время воздействия. Для учета нелинейности теплового анализа, следует задать зависимость используемых свойств материала от температуры.

Этапы процесса моделирования

Процесс моделирования в программной среде ANSYS состоит из следующих этапов:

1. построение модели:
 - определение типа элемента;
 - определение констант, по необходимости;
 - определение свойств материала;
 - определение геометрии модели;
2. разбиение модели на конечные элементы;

3. применение нагрузок;
4. получение решения и просмотр результата.

На первом этапе создания компьютерной модели нагрева фрикционного пресс-материала в электромагнитном поле была построена модель нагрева волластонита – основного компонента фрикционного материала. Рецепт фрикционной смеси содержит около десятка компонентов, в том числе волластонит, барит, каучуки, серу. Во время процесса прессования фрикционной смеси при температуре 165-185°C происходит процесс вулканизации каучука. Количественное содержание волластонита в фрикционном изделии составляет около 50 % от общей массы в зависимости от рецептуры.

Электромагнитный анализ

Построение модели. В диапазоне СВЧ строгое описание физических явлений проводится на основе теории электромагнитного поля. В волноводных структурах (например, прямоугольных волноводах) энергия передается электромагнитным полем, находящимся между проводниками. Теоретическое определение электромагнитных полей в линии передачи сводится к решению уравнений Максвелла (или следующих из них волновых уравнений) при заданных координатах, параметрах границ рассеиваемой области и параметрах заполняющей области среды.

Решение уравнений Максвелла в программной среде ANSYS производится методом конечных элементов. Область исследуемого поля разбивается на конечное число подобластей, называемых элементами. Граничные условия и нагрузки прикладываются к сплошной модели или к конечным элементам. Элементы имеют общие узловые точки, в совокупности они описывают форму области. Внутри каждого элемента искомую функцию аппроксимируют чаще всего полиномом. Число коэффициентов аппроксимирующего полинома соответствует числу узлов рассматриваемого элемента. В аппроксимирующие полиномы элемента вместо коэффициентов входят значения искомой функции в узлах и коэффициенты формы элемента. Проведя сквозную нумерацию узлов и элементов, получают систему уравнений для элементов всей области. Каждое уравнение элемента содержит неизвестное значение искомой функции в узлах элемента и коэффициенты формы элемента. Узловые значения функции определяют методом минимизации интегральной величины с помощью

некоторого функционала, метод взвешенных невязок, например метод Галеркина или наименьших квадратов и др. В методе Галеркина отправной точкой служит само дифференциальное уравнение - данный метод используется в ANSYS.

Для построения модели накладки был выбран трехмерный элемент HF119 второго порядка (рис. 2).

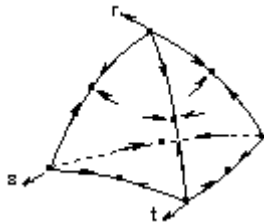


Рисунок 2 – Элемент HF119

На следующем этапе создания модели были определены свойства материалов (воздух и волластонит – изотропные материалы):

- относительная магнитная проницаемость (MURX);
- относительная диэлектрическая проницаемость (PERX);
- тангенс угла диэлектрических потерь (LSST).

Поскольку программная среда ANSYS не имеет интегрированного пакета по созданию геометрической конструкции модели, геометрические модели фрикционной накладки и волновода были созданы в САПР КОМПАС-3D v7 (рис. 3 и 4).

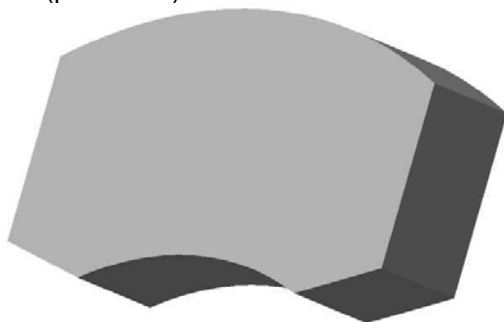


Рисунок 3 – Геометрическая модель пресс-матрицы

Для ввода СВЧ энергии в объем матрицы пресса был выбран стандартный прямоугольный волновод (0,09x0,045 м). Волновод сопрягается с матрицей через рупорный трансформатор электромагнитной энергии.

После создания геометрические модели были экспортированы в ANSYS через стандарт CAD и CAE систем Initial Graphics Exchange Specification (*.iges).

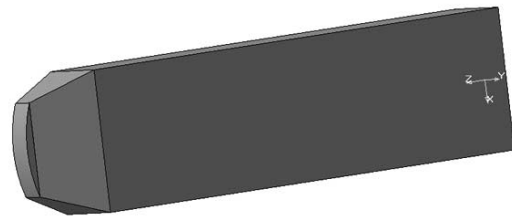


Рисунок 4 – Геометрическая модель волновода

Разбиение модели на конечные элементы

После импорта геометрической модели в ANSYS были произведены следующие операции:

- Логическое объединение объемов (объединение общих граней волновода и пресс-матрицы).
- Установление атрибутов для объемов. Атрибутами являются тип конечного элемента и номер материала для конечного объема (трехмерное моделирование) или области (двумерное моделирование).
- Разбиение объемов на конечные элементы (Точность результатов высокочастотного анализа зависит от способа разбиения на конечные элементы и размера конечного элемента. Рекомендуется, чтобы на длину волны или размер резонансной структуры приходилось не меньше 10 элементов. Для нагреваемого объема размер элемента 0,001 м, для волновода – 0,002 м).

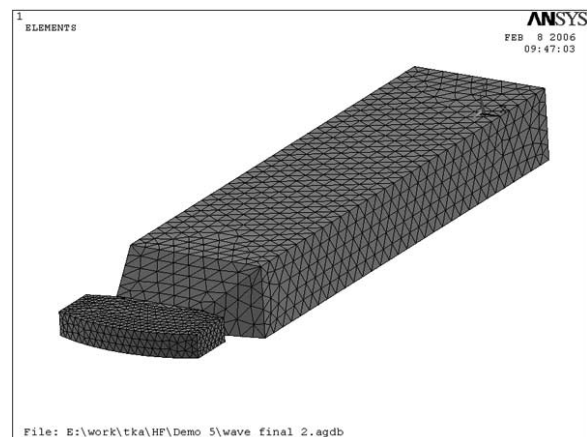


Рисунок 5 – Конечноэлементная сетка

Применение нагрузок

На следующем этапе были применены граничные условия. ANSYS позволяет применять три типа граничных условий:

- PEC – идеальный электрический проводник (электрическая стена), может быть

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАГРЕВА ВОЛЛАСТОНИТА ПРИ ВВЕДЕНИИ СВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ В ОБЪЕМ МАТРИЦЫ

использован для моделирования проводника, если потерями в нем можно пренебречь, или для уменьшения размеров модели, если картина распространения электрического поля известна заранее.

– PML – идеально согласованный слой, применяется для полного поглощения уходящей электромагнитной волны и исключения отражений в область вычислений.

– IBC – (англ. условие границы импеданса) поверхность потерь, данное граничное условие можно использовать для аппроксимации границы излучения, тонких слоев диэлектрика и неидеальных проводников.

Для всех поверхностей объемов был применен PEC, кроме общей поверхности для двух объемов и поверхности ввода СВЧ энергии.

В программе представлены основные типы волноводов: коаксиальный (TEM волна), прямоугольный (TE_{mn} , TM_{mn} волны), цилиндрический (TE_{mn} , TM_{mn} волны), parallel plate волновод (TE_{0n} , TE_{0n} , TM_{0n} волны). Для поверхности ввода СВЧ энергии был применен согласованный порт волновода с типом волны TE_{01} и мощностью излучения 1кВт (тип порта - impedance) [6, 7].

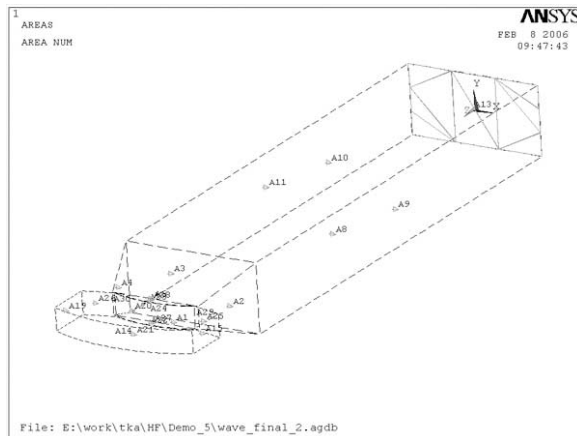


Рисунок 6 – Применение нагрузок

Для созданной ранее модели была создана база данных, содержащая граничные условия, информацию об источнике поля.

Получение решения и просмотр результата

Атрибутами являются тип конечного элемента и номер материала для конечного объема (трехмерное моделирование) или области (двумерное моделирование).

ANSYS позволяет проводить несколько типов анализов: для высокочастотных задач – модальный (Modal) или частотный (Har-

monic). Для построения данной модели был выбран частотный тип анализа – заданы частота 2,45 ГГц и номер используемого порта.

ANSYS записывает результаты гармонического ВЧ анализа в файл с расширением .rmg. Файл содержит следующие результаты [5]:

основные (базовые) данные:

– значение степени свободы AX;

вычисленные данные:

– электрическое поле в точке;
– интенсивность магнитного поля в точке;

– плотность тока проводимости в точке;
– выделение теплоты Джоуля на единицу объема;

– вектор Пойтинга для элемента;
– рассеянная мощность для элемента;
– средняя за время полученная энергия для элемента.

На основе данного файла могут быть получены следующие параметры электромагнитного поля:

поле:

– E, D, H, B контуры;

– E, D, H, B векторы;

– ток индукции;

– ближнее и дальнее поля E (электрическое), H (магнитное);

параметры электромагнитного поля (характеристики):

– матрица S – параметров (параметры рассеяния);

– напряжение, ток, сопротивление;

– RCS (radar cross section);

– параметры (характеристики) антенн;

– выделение теплоты Джоуля;

Результаты вычислений показаны рис. 7

и 8.

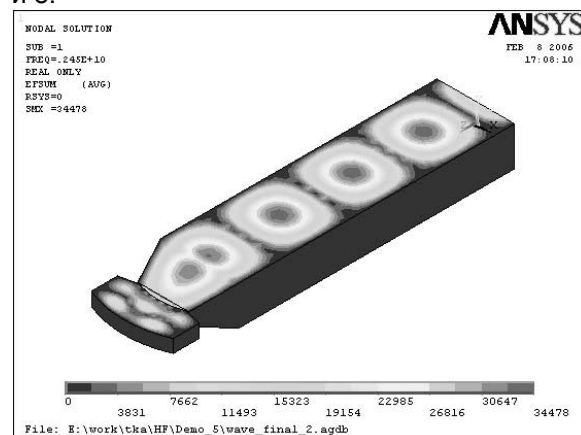


Рисунок 7 – Электрическое поле

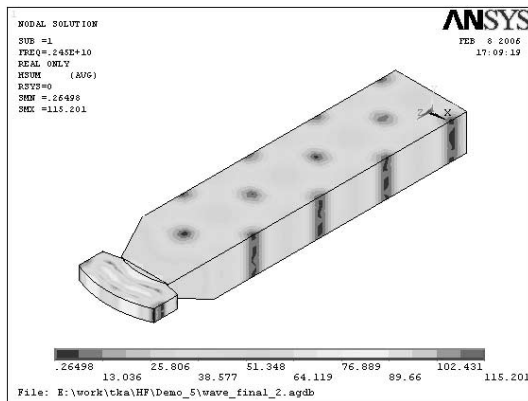


Рисунок 8 – Магнитное поле

Тепловой анализ

Задача теплового анализа заключается в расчете распределения температур и соответствующих тепловых параметров в системе или компоненте системы. Обычно представляют интерес следующие тепловые параметры:

- поле температур;
- величина тепловых потерь;
- температурные градиенты;
- тепловые потоки.

Основой теплового анализа в ANSYS является уравнение теплового баланса, полученное в соответствии с принципом сохранения энергии. ANSYS поддерживает основные виды теплопередачи (теплопроводность, конвекцию, излучение) и два вида теплового анализа:

1. Стационарный тепловой анализ определяет распределение температуры и других тепловых параметров при неизменных граничных условиях.
2. Нестационарный тепловой анализ определяет распределение температуры и других тепловых параметров при меняющихся во времени условиях.

После выполнения электромагнитного анализа был выполнен нестационарный тепловой анализ.

Построение модели

Для построения конечноэлементной модели был выбран элемент SOLID70 (рис. 9).

Были определены свойства материалов (воздух и волластонит – изотропные материалы):

- плотность;
- теплоемкость;
- теплопроводность;
- энтальпия.

Аналогично электромагнитному анализу были выполнены операции импорта модели, логического объединения объемов, установление атрибутов объемов, разбиение объемов на конечные элементы (для нагреваемого объема размер элемента 0,001 м, для волновода – 0,002 м).

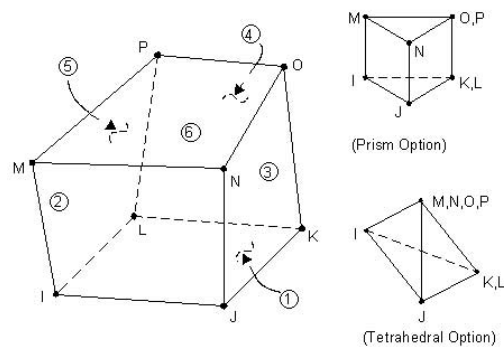


Рисунок 9 – Элемент SOLID70

Применение нагрузок

Граничные условия для данного типа анализа – теплоизоляция. В качестве нагрузки использовалось выделение тепла под действием СВЧ излучения. Продолжительность шага нагрузки 60 секунд, количество подшагов 10. В результате вычислений получено температурное поле материала при СВЧ нагреве (рис. 10).

При детальном анализе результатов моделирования были сделаны следующие выводы:

- 1 волластонит поглощает всю энергию, подводимую электромагнитными волнами;
- 2 волластонит нагревается равномерно по всему объему (при выбранной геометрической конструкции отсутствуют точки локального перегрева).

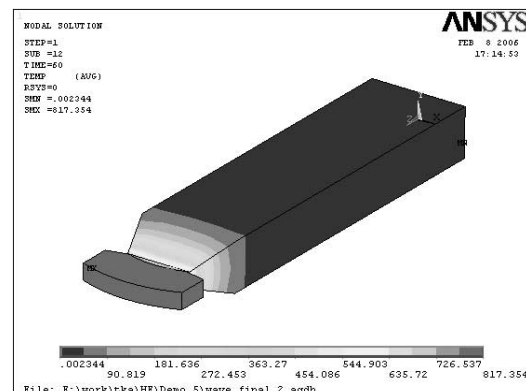


Рисунок 10 – Результат теплового анализа

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАГРЕВА ВОЛЛАСТОНИТА ПРИ ВВЕДЕНИИ СВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ В ОБЪЕМ МАТРИЦЫ

На следующем этапе работ планируется выполнить измерение физических и электрических параметров фрикционной композиции:

- плотности;
- теплопроводности;
- теплоемкости;
- энтальпии;
- относительной магнитной проницаемости (на частоте 2,45 ГГц);
- относительной диэлектрической проницаемости (на частоте 2,45 ГГц);
- электрического сопротивления (на частоте 2,45 ГГц);
- тангенса угла диэлектрических потерь (на частоте 2,45 ГГц).

После получения данных планируется построение полной модели нагрева фрикционной композиции с учетом фазовых переходов в материале во время нагрева.

ЛИТЕРАТУРА

1. Архангельский Ю.С. Установки диэлектрического нагрева. СВЧ установки. М., 2004. – 325 с.
2. Setup for test operation of the frictional material UHF heating Tunin, K.A.; Sypin, E.V.; Leonov, G.V.; Microwave Electronics: Measurements, Identification, Applications, 2003. MEMIA 2003. Proceedings of the 4th IEEE-Russia Conference 23-26 Dec. 2003 Page(s):118 – 121.
3. Обзор САПР СВЧ [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.rodnik.ru/htmls/f_main.htm.
4. Вайнштейн Л.А. Электромагнитные волны – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1988. – 440 с.
5. ANSYS Inc.: ANSYS Users Guide, Theory Reference manual/ Cannonsburg, USA.
6. Кац Б.М. и др. Оптимальный синтез устройств СВЧ с Т-волнами/ Под ред. В.П. Мещанова. – М.: Радио и связь, – 1984. – 288 с.
7. Бушминский И.П. Изготовление элементов конструкций СВЧ. Волноводы и волноводные устройства. Учеб. пособие для ВУЗов. М.: Высш. школа, 1974. – 304 с.