

Библиографические ссылки

1. Рыкалин Н. Н., Зуев И. В., Углов А. А. Основы электронно-лучевой обработки материалов. М. : Машиностроение, 1978.
2. Математические модели процессов изменения рентгеновского излучения от положения луча относительно

стыка при электронно-лучевой сварке / В. Я. Браверман, В. С. Белозерцев, Н. Н. Горяшин [и др.] // Вестник СибГАУ. Вып. 2. 2009. С. 247–251.

3. Башенко В. В. Электронно-лучевые установки. Л. : Машиностроение, 1975.

V. Ya. Braverman, V. S. Belozertsev

DEPENDENCE OF X-RAY RADIATION FROM BEAM POSITION AGAINST JOINT WITH DIFFERENT FOCUSING DEGREE IN THE PROCESS OF ELECTRON BEAM WELDING

The article considers dependence of X-ray emission from the position of the beam against joint at different focus in the process of electron-beam welding. The results are used for the synthesis of systems of automatic direction of beam.

Keywords: electron beam welding, X-ray radiation, mathematical expectation, density of electron distribution.

© Браверман В. Я., Белозерцев В. С., 2010

УДК 621.787

Л. И. Оборина, А. Е. Романов, Б. К. Исмаилов, И. В. Стерехов, И. В. Трифанов

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛОСНО-ПРОПУСКАЮЩИХ ФИЛЬТРОВ, РАБОТАЮЩИХ В СВЧ-, КВЧ-ДИАПАЗОНАХ

Представлены методы изготовления полосно-пропускающего фильтра на волноводе прямоугольного сечения, изготавливаемого из размеростабильного материала сплава 32 НКД.

Ключевые слова: волновод, деформирующее протягивание, многостороннее деформирование, напряжение.

Приоритетными тенденциями развития высокочастотных систем спутниковой связи КВЧ-диапазона являются интенсивное освоение Ка-диапазона длин волн (СВЧ-, КВЧ-диапазонов), а также миллиметрового диапазона волн (КВЧ-диапазона) [1].

Ключевыми свойствами этих перспективных систем спутниковой связи будут являться технические решения реализации высокоскоростных услуг, которые обеспечат применение спутниковой связи в массовых сегментах рынка, где наибольшее значение имеют факторы глобальности услуг, конвергенции абонентских сервисов и мультимедийности информации.

Технологические достижения в области создания элементной базы КВЧ-диапазона будут определять уровень развития радиотехнических средств, антенно-фидерных систем, возможности, глубину и содержание освоенного КВЧ-диапазона. Одной из важных задач является разработка научно-технологических решений при изготовлении полосно-пропускающих фильтровых устройств, обеспечивающих электромагнитную совместимость между приемным и передающим трактом ретранслятора, а также минимальные вносимые потери в заданной полосе пропускания и стабильность ра-

бочих характеристик в условиях воздействия космической среды при циклическом изменении температуры в диапазоне ± 150 °С.

В связи с отмеченным для изготовления фильтровых устройств, обеспечивающих электромагнитную совместимость стволов, ретранслятора целесообразно использовать материалы с малым температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР) $1 \div 2$ $1/^\circ\text{C}$.

Таким требованиям отвечает сплав 32 НКД, основные характеристики которого представлены в табл. 1.

Предварительный расчет волноводных полосно-пропускающих фильтров с параллельными индуктивными связями проводится по формулам [2]. Длина волн в волноводе прямоугольного сечения $a \times b$ имеет вид

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2 \times a}\right)^2}}, \quad (1)$$

где λ_g – длина критической волны; λ – длина волны в воздухе; a – наибольший поперечный размер прямоугольного волновода.

Необходимое количество резонаторов полосно-пропускающего фильтра Чебышевского типа определяется

по кривым [2], из условия обеспечения развязки на заданных частотах.

По результатам предварительного расчета 5-ти резонаторного полуволнового ППФ с непосредственными связями проведено СВЧ-моделирование фильтра с целью уточнения размеров: диаметров стержней и длин полуволновых резонаторов.

На рис. 1 показана 3D-модель 5-ти резонаторного полуволнового ППФ.

Результаты СВЧ-моделирования фильтра в узкоспециализированной программе по Wale Wizard приведены на рис. 2.

Из графика видно, что электрические характеристики фильтра выполняют требования по обеспечению электромагнитной совместимости стволов ретранслятора. Важным фактором является выбор материала для изготовления ППФ и технологии, обеспечивающей радиотех-

нические характеристики в условиях эксплуатации – при циклическом изменении температуры.

Для изготовления корпусов ППФ из сплава 32НКД может быть использован метод деформирующего протягивания с многосторонним обжатием или метод электроэрозионной обработки проволочным электродом. Метод деформирующего протягивания при изготовлении корпусов ППФ состоит из двух этапов: получение волноводов круглого сечения, изготовление волноводов прямоугольного сечения из этих же труб методом многостороннего деформирования.

Метод изготовления волноводных элементов круглого сечения деформирующим протягиванием заключается в холодном пластическом деформировании трубчатой заготовки при поступательном перемещении через отверстие с некоторым натягом специального инструмента-дорна. При этом обеспечивается повышение точ-

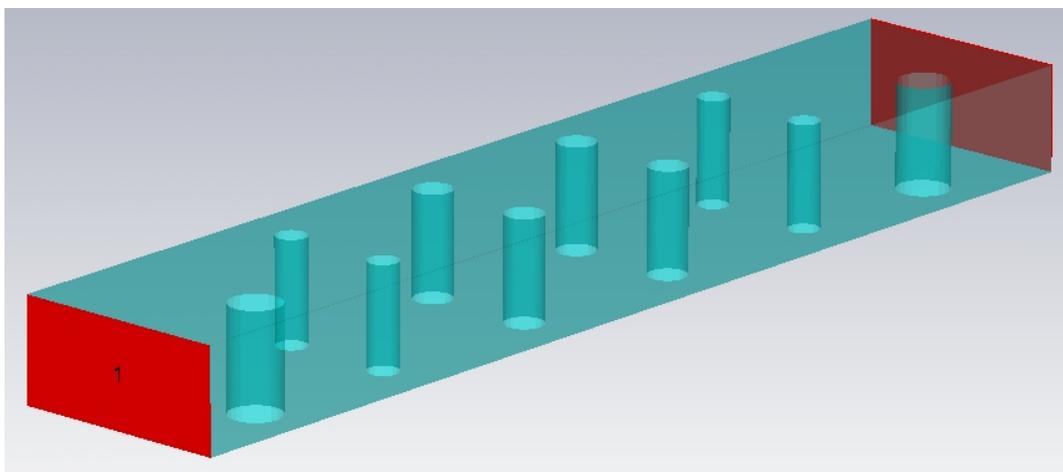


Рис. 1. 3D-модель 5-ти резонаторного полуволнового ППФ с непосредственными связями

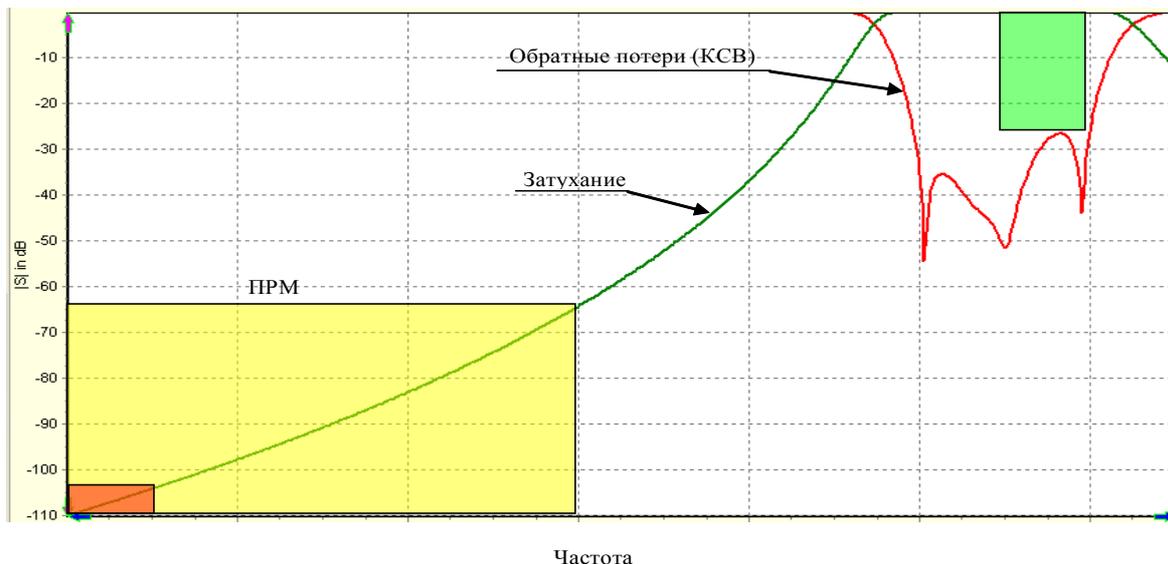


Рис. 2. Расчетные характеристики 5-ти резонаторного полуволнового ППФ. Моделирование в программе mWave Wizard. ПРМ – верхний диапазон частот

Таблица 1

Основные характеристики сплава 32 НКД

Сплав	$\alpha_{ср} \cdot 10^5, K^{-1}$ (20÷100 °С)	Точка Кюри, °С	$\rho, \text{мкОм}$	E, МПа	$\delta_e, \text{МПа}$	$\delta, \%$	$H_c, \text{А/М}$
32 НКД	1	220	0,78	14100	451	41	12,7

ности отверстий, интенсивное сглаживание неровностей и упрочнение поверхностного слоя. В поверхностном слое формируются как правило сжимающие остаточные напряжения [4].

В качестве инструмента-дорна для изготовления круглых волноводов использовали стальные протяжки, выполненные в виде двух усеченных конусов, с углом $6 \div 10^\circ$ соединенных цилиндрической ленточной шириной $0,1 \div 3$ мм.

Для изготовления протяжек целесообразно применение твердых сплавов, обеспечивающих высокую стойкость инструмента и устраняющих в подавляющем большинстве случаев схватывание обрабатываемого материала заготовки волновода и инструментального материала. Инструменты-дорны диаметром $d \geq 5$ мм могут выполняться сборными. Инструменты меньшего диаметра рекомендуется изготавливать цельными. Наиболее работоспособными являются инструменты из твердых сплавов ВК6, ВК8, ВК15, ВК20, а также ХВГ с твердостью $HR_C 60 \div 62$ и шероховатостью поверхности $Ra 0,16$ мкм. К основным параметрам процесса деформирующего протягивания относится суммарный натяг и натяг за одно деформирующее протягивание, а также число циклов деформирования. Эти параметры, определяя напряженно-деформированное состояние заготовки, оказывают решающее влияние на результаты обработки и ТКЛР сплава 32НҚД. Установлено, что с увеличением суммарного натяга и уменьшением натяга за одно деформирующее протягивание повышается точность и качество поверхностного слоя каналов труб волноводов.

Влияние скорости деформирующего протягивания в диапазоне от 1 до 30 м/мин на энергосиловые параметры и результаты обработки невелико [4].

Важное влияние на процесс деформирующего протягивания оказывает применяемый смазочный материал, устраняющий схватывание инструмента-дорна с заготовкой и обеспечивающий снижение деформирующего усилия, а также повышение точности и качества поверхности. Для обработки круглых заготовок деформирующим протягиванием рекомендуется использовать минеральные масла с присадками и синтетические масла (табл. 2).

Процесс деформирующего протягивания труб волноводов может обеспечить высокую точность отверстий (до IT6-IT7), получить малую шероховатость поверхности (до $Ra 0,05 \div 0,1$ мкм), однако при этом значительно упрочня-

ются поверхностный слой (рост микротвердости может достигать $130 \div 260$ %) и создаются сжимающие остаточные напряжения, что нежелательно при нанесении токопроводящих покрытий. Наибольшая величина остаточных напряжений может быть близка к пределу текучести материала заготовки σ_T и это будет являться причиной образования трещин на обрабатываемой поверхности заготовки, что недопустимо для обеспечения качества волноводов.

Технологические возможности деформирующего протягивания существенно зависят от отношения диаметра наружной поверхности заготовки к диаметру ее отверстия (D/d). Предложено [4] на основе результатов теоретических и экспериментальных исследований разделять подвергаемые деформирующему протягиванию заготовки на два типа: с конечной ($D/d < 3$)b, бесконечной ($D/d \geq 3$) толщиной стенки. Волноводные заготовки имеют $D/d = 1,3 \div 1,8$, являются тонкостенными с конечной толщиной стенки для обеспечения малых массогабаритных характеристик. Их стенки в процессе деформирующего протягивания могут подвергаться сплошной и пластической деформации.

При деформирующем протягивании материал заготовки в контактном слое находится в условиях, близких к объемному сжатию.

В остальной части заготовки напряженно-деформированное состояние близко к состоянию трубы, подвергнутой воздействию равномерного внутреннего давления [5]. Фактическая ширина контакта работающего конуса инструмента-дорна с заготовкой L_ϕ из-за ее изгиба (рис. 3) в целом оказывается существенно меньше геометрической ширины, определяемой зависимостью:

$$L_T = a / 2 \sin \alpha, \quad (2)$$

где a – натяг на зуб; α – половина угла рабочего конуса инструмента-дорна.

В зависимости от соотношения между в неконтактной деформации за рабочим конусом инструмента-дорна $h_{вк}$ и упругим восстановлением материала заготовки $h_{ув}$ (рис. 3), обработка деформирующим протягиванием круглой заготовки трубы волновода может сопровождаться как положительной, так и отрицательной усадкой отверстия (разбивкой h_{yc}) [5; 6].

Для обоснования проектирования операций изготовления волноводов деформирующим протягиванием не-

Таблица 2

Эффективность действия смазок при изготовлении волновода методом многостороннего деформирования из сплава 32НҚД

Параметры УЗК	Вид применяемой смазки	$f_{тр}$
$F = 200$ кГц, $A = 8$ мкм	Масло индустриальное	0,42
— // —	Масло VELS	0,26
— // —	Масло касторовое	0,21
— // —	Графитовая смазка, полученная энергией взрыва	0,38
— // —	Масло ESSO	0,23

обходимо изучение параметров контактного взаимодействия инструмента-дорна с заготовкой: усилий дорнования, контактных давлений и усадки отверстий, а также исследования точности отверстий, качества их поверхностного слоя, влияния деформации и режимов термообработки на структуру сплава 32НКД и температурный коэффициент линейного расширения.

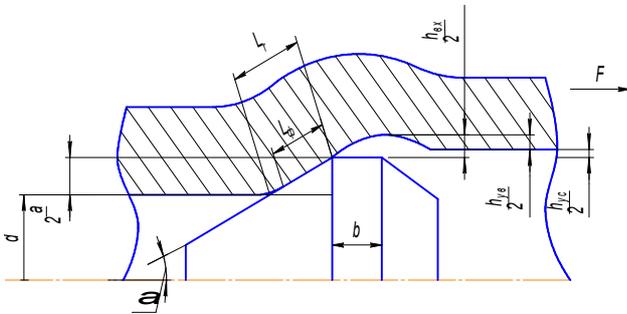


Рис. 3. Схема взаимодействия инструмента-дорна с цилиндрической заготовкой при $D/d < 3$

Известно, что влияние пластической деформации на коэффициент температурного расширения сплава 32НКД описывается выражением

$$\beta = \beta_0 (1 + A \cdot \varepsilon), \quad (3)$$

где β_0 – коэффициент температурного расширения недеформированного металла; ε – степень деформации; A – коэффициент, учитывающий физические свойства деформируемого металла:

$$A = \chi_T E \gamma / 3, \quad (4)$$

где χ_T – коэффициент изотермической сжимаемости; E – модуль упругости; γ – параметр Грюнайзера:

$$\gamma = \frac{\partial \ln \theta}{\partial \ln V}, \quad (5)$$

где θ – температура Дебая; V – объем.

Значение A для сплава 32НКД находится в пределах $1,3 \div 2,5$.

В связи с этим можно сделать вывод, что деформация при деформирующем протягивании способна изменить коэффициент термического расширения сплава 32НКД в большую сторону, что недопустимо при изготовлении ППФ.

Для обеспечения точности ТКЛР требуемого качества рабочей поверхности каналов труб волноводов круглого сечения необходимо обеспечить соответствующий уровень контактных давлений в зоне деформирования со стороны инструмента-дорна.

Контактные давления, определяются через средние давления на рабочем конусе [6] по формуле

$$p = \frac{F}{\pi d_c L_\phi (\sin \alpha + f \cos \alpha)} = \frac{cd^x a^y \text{HB}}{\pi d_c L_\phi (\sin \alpha + f \cos \alpha)}, \quad (6)$$

где F – усилие деформирующего протягивания; d_c – диаметр рабочего конуса посреди ширины контакта; L_ϕ – фактическая ширина контакта рабочего корпуса инструмента-дорна; f – коэффициент трения между инструментом дорном и трубчатой заготовкой, половина угла рабо-

чего инструмента-дорна; C – коэффициент, зависящий от вида обработки; HB – твердость обрабатываемого материала; d – диаметр канала трубчатой заготовки; a – степень натяга; x, y – показатели степени, зависящие от характера обработки; α – угол конуса инструмента-дорна.

Средние контактные давления, как показатели исследования [6], определяются в основном величиной натяга (a), механическими свойствами материала заготовок и практически не зависят от диаметра канала трубы волновода. При уменьшении натяга контактные давления возрастают и могут достигать $(6-9)\delta_T$ предела текучести сплава 32НКД. Наибольшие средние контактные давления наблюдаются в области $a = 0,012 \dots 0,015$ мм. Эти наибольшие контактные давления при малых натягах необходимо использовать на финишных операциях для обеспечения наименьшей шероховатости поверхности [6]. Повышение средних контактных давлений в $3 \dots 6$ раз на финишных операциях обеспечивает $Ra 0,01-0,16$ мкм после 4 циклов дорнования, что необходимо для снижения потерь в волноводе при прохождении волны.

В связи с отмеченным, механика пластического деформационного протягивания при изготовлении труб волноводов должна строиться по следующей технологической схеме: изготовление труб волноводов механической обработкой с последующим развертыванием каналов, отжиг в вакууме для снятия остаточных напряжений, электрохимическое протягивания канала для удаления дефектного слоя, дорнования канала трубы за несколько переходов инструментами-дорнами с возрастающими размерами диаметров.

При первом деформирующем протягивании целесообразно использовать 50–60 % суммарного натяга дорнования, затем производить отжиг в вакууме для снятия напряжений. Последующие переходы необходимо производить с малыми натягами, при которых обеспечивается высокий уровень контактных давлений, что позволит получить высокое качество поверхности (низкую шероховатость, отсутствие трещин) и обеспечить ТКЛР в заданных пределах. Для изготовления ППФ прямоугольного сечения из сплава 32НКД методом многостороннего деформирования внутренний диаметр трубчатой заготовки определяется по формуле $d = 1,2a$, а толщина стенки труб частотой заготовки имеет вид $b = 1,25h$, где a – наибольший поперечный размер прямоугольного волновода; h – толщина стенки прямоугольного волновода – корпуса ППФ.

Сущность метода многостороннего деформирования заключается в деформирующем протягивании трубчатой заточки через неподвижный инструмент-дорн и одновременном многостороннем обжатии ее регулируемой роликовой фильерой (рис. 4).

Роликовая фильера образуется двумя парами роликов, которые монтируются в общей обойме, что позволяет по программе производить обжатие трубчатой заготовки. Процесс изготовления труб волноводов методом многостороннего деформирования может быть описан математически на основе теории больших деформаций металла. Используя геометрический подход, основанный на особенностях изменения формы сечения от круглой до прямоугольной, можно произвести расчет усилий и

напряжений при деформирующем протягивании. Их величины зависят от энергии деформирования и сил трения. При больших деформациях в качестве меры деформирования можно использовать логарифмические деформации:

$$\varepsilon_y = \ln(h/b); \varepsilon_z = \ln(l/l_0), \quad (7)$$

где h – толщина стенки прямоугольного волновода; b – толщина стенки трубчатой заготовки; l_0 – начальная длина трубчатой заготовки; l – длина волновода прямоугольного волновода после деформирующего протягивания.

Напряжение δ_z в каждом сечении деформируемой трубы определяется по формуле

$$\delta_z = T_B(z)/F_z, \quad (8)$$

где F_z – площадь поперечного сечения прямоугольной трубы волновода; $T_B(z)$ – усилие деформирующего протягивания.

Для расчета δ_z при напряженно-деформирующем протягивании волновода прямоугольного сечения рекомендуется применять формулу [7]

$$\frac{d\delta_z}{dz} + \delta_z \left(c + \frac{dh}{dz} \right) = fc(\varepsilon_z - \varepsilon_y), \quad (9)$$

где

$$C = \frac{1-0,5}{1+0,5f_{тр}^a \left(\frac{dh}{dz} \right)} \times \left[f_{тр}^a - \frac{dh}{dz} \right] - f_{тр}^a,$$

$f = \frac{\delta_i}{\varepsilon_i}$ – функция пластичности; ε_i – деформация при i -ом цикле протягивания; δ_i – напряжения; $h(z)$ – сечение стенки трубы волновода прямоугольного сечения; $f_{тр}^a, f_{тр}^b$ – коэффициенты трения в парах (трубчатая заготовка – инструмент (дорн) и ролик фильеры – трубчатая заготовка).

Для уравнения (9) установим следующее краевые условия $h(0) = l; \delta_z(0) = k$ и рассчитаем напряжения в сечениях очага деформации волновода с учетом допустимых ε_z и ε_y для сплава 32НКД, обеспечивающие ТКЛР $1 \div 2 \text{ 1/}^\circ\text{C}$. Расчеты показывают, что усилия протягивания в сечениях очага деформации (рис. 5), а также напряжения в сечениях очага деформации (рис. 6) носят нелинейных характер и могут влиять на ТКЛР волновода ППФ. Для обеспечения требуемого ТКЛР необходимо, чтобы $\delta_z \leq 400$, что подтверждается проведенными дилатометрическими исследованиями [7].

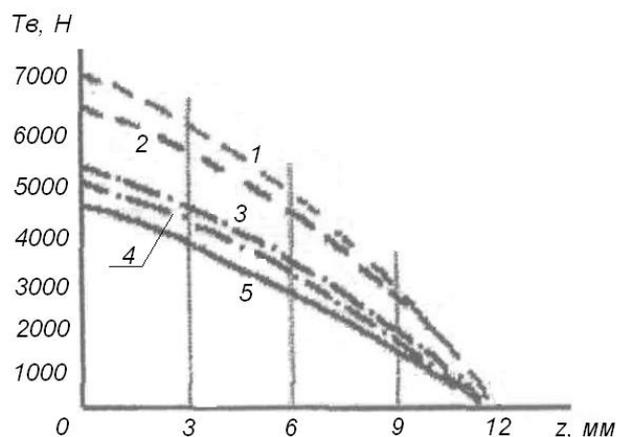


Рис. 5. Усилия протягивания в сечениях очага деформации l -волновода сечением $3,6 \times 1,8$ мм из сплава 32НКД: 1 – усилие обжатия $\Delta = 0,40$ мм; 2 – усилие обжатия $\Delta = 0,15$ мм; 3 – усилие обжатия $\Delta = 0,10$ мм; 4 – усилие обжатия $\Delta = 0,08$ мм; 5 – усилие обжатия $\Delta = 0,05$ мм; 6 – усилие обжатия $\Delta = 0,05$ мм с наложением УЗК

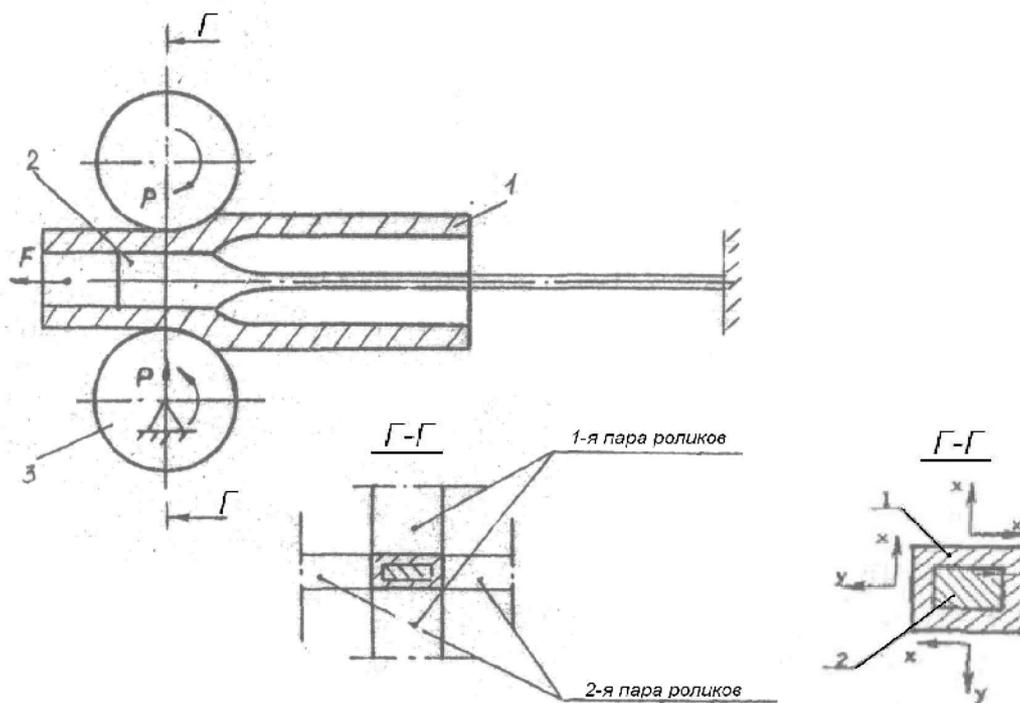


Рис. 4. Схема процесса изготовления прямоугольного волновода ППФ из сплава 32НКД методом многостороннего деформирования: 1 – трубчатая заготовка волновода; 2 – инструмент-дорн; 3 – ролики роликной фильеры

Предложенная методика позволяет обеспечить низкий ТКЛР при изготовлении ППФ методом многостороннего деформирования и требуемое качество работы каналов систем спутниковой связи путем стабилизации радиофизических характеристик.

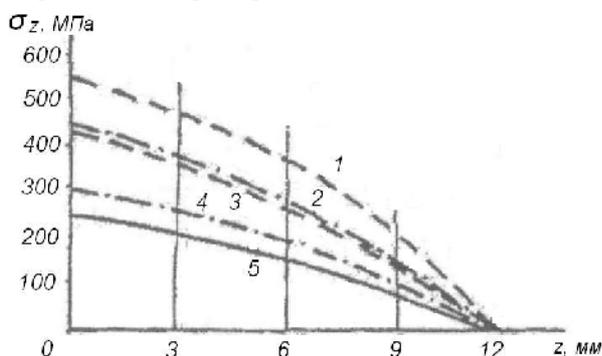


Рис. 6. Напряжения σ_z в сечениях очага деформации: l -волновода сечением $3,6 \times 1,8$ мм: 1 – усилие обжатия $\Delta = 0,40$ мм; 2 – усилие обжатия $\Delta = 0,15$ мм; 3 – усилие обжатия $\Delta = 0,1$ мм; 4 – усилие обжатия $\Delta = 0,08$ мм; 5 – усилие обжатия $\Delta = 0,05$ мм; 6 – усилие обжатия $\Delta = 0,05$ мм с наложением УЗК

Библиографические ссылки

1. Достижения в освоении миллиметровых и субмиллиметровых волн / Р. П. Быстров, А. В. Соколов, Л. В. Федорова [и др.] // Успехи современной радиоэлектроники. 2009. № 6. С. 52–63.
2. Матей Д. Л., Янг Л., Джонс Е. М. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и связи. Т. 1. М.: Связь, 1976.
3. Модель А. И. Фильтры СВЧ в радиорелейных системах. М.: [Б. и.], 1976.
4. Розенберг А. М., Розенберг О. А. Механика пластического деформирования в процессе резания и деформирующего протягивания. Киев: Наукова думка, 1990.
5. Скворцов В. Ф., Арляпов А. Ю. Дорнование глубоких отверстий малого диаметра: монография. Томск: Изд-во ТПУ, 2005.
6. Трифанов И. В., Оборина Л. И., Стерехов И. В. Исследование параметров взаимодействия инструментальной заготовки при изготовлении каналов волноводов малого сечения // Вестник СибГАУ. 2007. № 4. С. 126–127.
7. Дилатометрические исследования физических параметров труб волноводов / Л. И. Оборина, И. В. Трифанов, И. В. Стерехов [и др.] // Вестник СибГАУ. 2010. № 1. С. 42–46.

L. I. Oborina, A. E. Romanov, B. K. Ismaylov, I. V. Sterehov, I. V. Trifanov

TECHNOLOGICAL FEATURES OF MANUFACTURING BAND-PASS FILTERS WORKING IN UHF-, EHF-RANGES

Manufacturing methods of band-pass filter on a wave guide of rectangular section made of size stable material of 32 NKD alloy are presented in this article.

Keywords: wave guide, deforming inhaling, multilateral deformation, pressure.

© Оборина Л. И., Романов А. Е., Исмаилов Б. К., Стерехов И. В., Трифанов И. В., 2010

УДК 621.791.971

А. А. Безруких, Р. А. Мейстер, М. А. Лубнин, С. А. Готовко

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ НАПЛАВКИ НЕЗАВИСИМОЙ ТРЕХФАЗНОЙ ДУГОЙ ПЛАВЯЩИМИСЯ ЭЛЕКТРОДАМИ

Приведена технология высокоэффективного процесса наплавки независимой трехфазной дугой покрытыми электродами. Доля участия основного металла в наплавленном состоянии не превышает 10 %, что неосуществимо при однодуговой наплавке.

Ключевые слова: наплавка, независимая трехфазная дуга, плавящиеся электроды.

Условия работы технических систем, в том числе космической техники, требуют производства узлов и деталей со специфическими свойствами рабочих поверхностей, таких как жаростойкость и жаропрочность, износостойкость, коррозионная стойкость и т. д. При этом необходимо экономное использование дорогостоящих материалов. Данная проблема решается путем использования наплавочных процессов. Однако широко распространенный однодуговой способ наплавки покрытыми

электродами имеет серьезные недостатки, которыми являются низкая производительность и необходимость нанесения 4–5-ти слоев для получения требуемого состава наплавленного металла.

Применение переменного тока в наплавочных процессах позволяет использовать простые и дешевые источники питания, обладающие более высокими КПД в сравнении с выпрямителями. Дуга переменного тока свободна от такого недостатка как магнитное дутье, поэтому использо-