

машину с неопределенностью результатов измерений не более 5 мкм в любой точке рабочего объема.

Библиографические ссылки

1. Многофункциональная прецизионная лазерная технологическая система для обработки больших размеров деталей произвольной топологии / В. С. Базин, А. Г. Верхогляд [и др.] // Автометрия. Т. 41. № 6. 2005. С. 107–114.

2. Ахманов С. А., Никитин С. Ю. Физическая оптика. М.: Изд-во МГУ, 1998.

3. Ведерников В. М., Кирьянов В. П., Лебедев Г. А. Применение лазерного интерферометра для контроля и юстировки измерительных систем тяжелых станков // Станки и инструмент. № 4. 1978.

A. G. Verkhoglyad, M. F. Stupak, Yu. V. Chugui

SURFACE LASER MICROPROFILING

Brief description of main technical decisions and experimental results of testing of laser technological complex are presented. Measurement error in stop-start mode doesn't exceed 2 μm, treatment error under the movement of executive element on the arbitrary contour was no more than 20 μm. The operation speed under the surface microprofiling exceeded 9m/min. The time of continuous work in automatic mode has been more than 15 hours within the temperature range from +18 up to +30 C°.

Keywords: laser technological complex, bulk articles laser treatment, cutting, ablation, measurement of 3D objects geometry.

© Верхогляд А. Г., Ступак М. Ф., Чугуй Ю. В., 2010

УДК 621.791.72

В. Я. Браверман, В. С. Белозерцев

ЗАВИСИМОСТЬ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ ПОЛОЖЕНИЯ ЛУЧА ОТНОСИТЕЛЬНО СТЫКА ПРИ РАЗЛИЧНОЙ СТЕПЕНИ ФОКУСИРОВКИ В ПРОЦЕССЕ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ*

Рассматривается зависимость рентгеновского излучения от положения луча относительно стыка при различной фокусировке в процессе электронно-лучевой сварки. Результаты используются для синтеза систем автоматического направления луча.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка; рентгеновское излучение; математическое ожидание; плотность распределения электронов.

При электронно-лучевой сварке (ЭЛС) сходящимися электронными пучками положение фокуса луча относительно свариваемых поверхностей является одним из определяющих технологических параметров процесса [1]. Кроме того, степень фокусировки влияет как на чувствительность систем управления положением луча относительно стыка, так и на их устойчивость.

Зависимость рентгеновского излучения (РИ) от положения луча относительно стыка свариваемых деталей описывается следующим выражением [2]:

$$J_{\text{отн}} = \left\{ 1 - \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{x_1}^{x_2} \exp \left[-\frac{(x-\varepsilon)^2}{2\sigma^2} \right] dx \right\}, \quad (1)$$

где ε – математическое ожидание (положение луча относительно стыка); X – координата оси стыка, $x = 0$; x_1 и x_2 –

координаты кромок стыка (разность x_1 и x_2 определяет зазор в стыке).

Представление в выражении (1) плотности распределения электронов в виде среднеквадратического отклонения σ носит принципиальный характер и не отражает связи с параметрами электронно-оптических систем электронно-лучевых пушек и зависимости от смещения поверхности свариваемых деталей относительно плоскости острой фокусировки. В связи с этим предлагается следующее определение среднеквадратического отклонения:

$$\sigma = \sigma_0 + |\Delta\sigma(\Delta b)| + |\Delta\sigma(\Delta I_{\phi})|,$$

где σ_0 – минимальное σ ; $\Delta\sigma(\Delta b)$ – приращение σ в зависимости от смещения Δb поверхности свариваемых деталей относительно плоскости острой фокусировки; $\Delta\sigma(\Delta I_{\phi})$ – приращение σ в зависимости от приращения

* Работа выполнена при финансовой поддержке АБЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» (код проекта 2957).

тока (ΔI_ϕ) фокусирующей системы относительно тока острой фокусировки.

Допустим, при токе фокусирующей системы (ФС) $I_{\phi 1}$ электронный луч сфокусирован на поверхности свариваемых деталей (СД) с фокусным расстоянием, равным f_1 (рис. 1). При значении тока фокусирующей системы $I_{\phi 2}$ изменится положение фокуса луча и окажется на расстоянии f_2 . Изменение тока фокуса на ΔI_ϕ приводит к увеличению у на $\Delta\sigma$.

Согласно рис. 1 можно найти следующее:

$$\frac{\Delta\sigma(\Delta I_\phi)}{f_1 - f_2} = \frac{R_1}{f_2},$$

где R_1 – средний радиус рассеяния электронов в объеме фокусирующей системы.

Отсюда

$$\Delta\sigma(\Delta I_\phi) = \left| R_1 \left(\frac{f_1}{f_2} - 1 \right) \right|.$$

Абсолютное значение $\Delta\sigma(\Delta I_\phi)$ свидетельствует о том, что изменение тока фокусирующей системы ΔI_ϕ относительно тока острой фокусировки приводит к увеличению σ относительно минимального σ_0 .

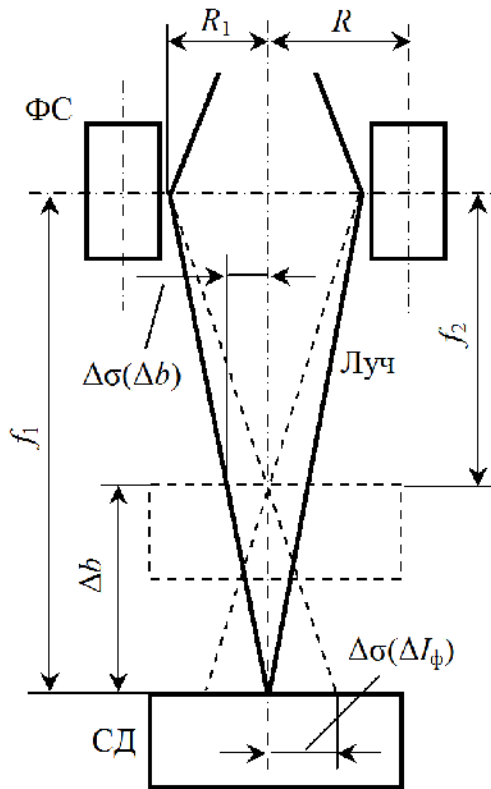


Рис. 1. К расчету зависимости σ от Δb и ΔI_ϕ

Известно соотношение, связывающее фокусное расстояние с параметрами фокусирующей системы и током фокуса [3]:

$$f \approx \frac{DU}{(I_\phi W)^2},$$

где I_ϕ – ток фокусирующей системы; W – количество витков фокусирующей системы; U – ускоряющее напряжение; $D \approx 48R$ – параметр фокусирующей системы; R –

средний радиус обмотки. С учетом этого получим следующее:

$$\Delta\sigma(\Delta I_\phi) = \left| R_1 \left[\frac{(I_{\phi 1} + \Delta I_\phi)^2}{I_{\phi 1}^2} - 1 \right] \right|, \quad (2)$$

где $I_{\phi 2} = I_{\phi 1} + \Delta I_\phi$.

График зависимости (2) для электронно-лучевой пушки КЭП-2М ($R_1 \approx 10$ мм; $W = 5000$; $U = 25$ кВ; $I_{\phi 1} = 50$ мА) приведен на рис. 2.

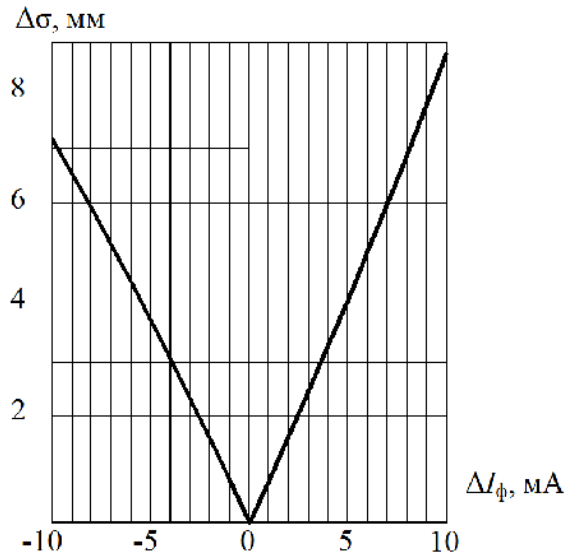


Рис. 2. Зависимость приращения радиуса луча от ΔI_ϕ

Представляет интерес зависимость смещения плоскости острой фокусировки Δb от приращения ΔI_ϕ тока фокусирующей системы. Согласно рис. 1 можно найти следующее значение:

$$\Delta b = f_1 - f_2 \frac{DU}{I_{\phi 1}^2 W^2} \left[1 - \frac{I_{\phi 1}^2}{(I_{\phi 1} - \Delta I_\phi)^2} \right]. \quad (3)$$

График зависимости (3) для электронно-лучевой пушки КЭП-2М представлен на рис. 3. Видно, что приращение тока фокусирующей системы на 1 мА приводит к смещению плоскости острой фокусировки почти на 40 мм. Это свидетельствует о необходимости стабилизации тока фокусирующей системы.

Зависимость $\Delta\sigma$ от Δb можно определить следующим образом:

$$\Delta\sigma(\Delta b) = \left| \frac{R_1}{f_1} \Delta b \right|,$$

или

$$\Delta\sigma(\Delta b) = \left| \frac{(I_{\phi 1} W)^2 R_1}{DU} \Delta b \right|. \quad (4)$$

График зависимости (4) приведен на рис. 4. Расчеты произведены для электронно-лучевой пушки КЭП-2М, с углами сходимости электронного пучка $\alpha_n \approx 0,01 \div 0,03$ рад.

Очевидно, что результаты ЭЛС электронно-лучевыми пучками с меньшими углами сходимости менее подвержены дестабилизирующим факторам.

Подставим уравнение (2) в (1):

$$J_{\text{отн}} = 1 - \frac{1}{\left\{ \sigma_0 + \left| R_1 \left[\frac{(I_{\phi 1} + \Delta I_{\phi})^2}{I_{\phi 1}^2} - 1 \right] \right| \right\} \sqrt{2\pi}} \times \int_{x_1}^{x_2} \exp \left\{ - \frac{(x - \varepsilon)^2}{2 \left\{ \sigma_0 + \left| R_1 \left[\frac{(I_{\phi 1} + \Delta I_{\phi})^2}{I_{\phi 1}^2} - 1 \right] \right\}^2} \right\} dx. \quad (5)$$

Соотношение (5) описывает зависимость интенсивности рентгеновского излучения от положения луча относительно стыка при различных токах расфокусировки электронного луча (рис. 5). При расчетах зазор в стыке $\Delta = x_2 - x_1$ принят равным 0,1 мм, $\sigma_0 = 0,1$ мм. Характер зависимости аналогичен приведенным в литературе [2], где представлены характеристики интенсивности рентгеновского излучения в зависимости от положения луча относительно стыка при различных σ . Этого следовало ожидать, так как изменение тока фокусирующей системы эквивалентно изменению σ в соответствии с (5).

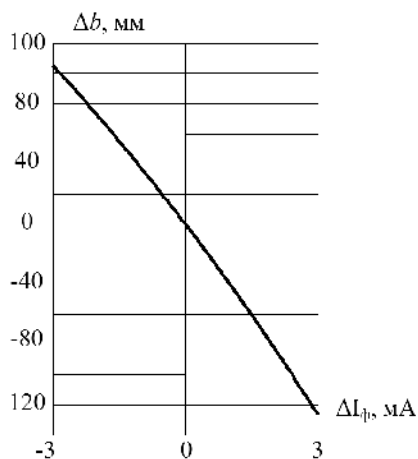


Рис. 3. Зависимость смещения плоскости острой фокусировки от ΔI_{ϕ}

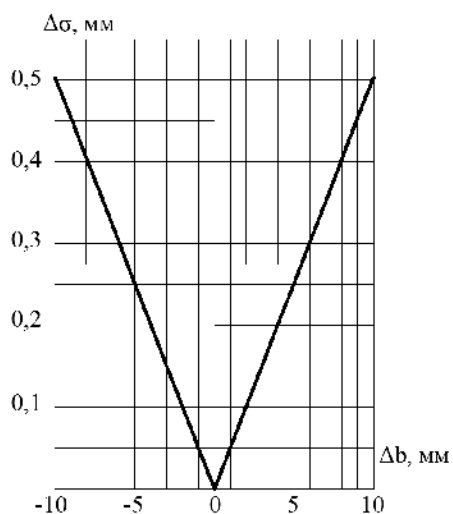


Рис. 4. Зависимость приращения радиуса луча от смещения плоскости свариваемых деталей

Если в выражение (1) вместо u подставить (4), то получим характеристику интенсивности рентгеновского излучения в зависимости от положения луча относительно стыка и положения поверхности свариваемых деталей относительно плоскости острой фокусировки (рис. 6):

$$J_{\text{отн}} = 1 - \frac{1}{\left[\sigma_0 + \frac{(I_{\phi 1} W)^2 R_1}{DU} \Delta b \right] \sqrt{2\pi}} \times \int_{x_1}^{x_2} \exp \left\{ - \frac{(x - \varepsilon)^2}{2 \left[\sigma_0 + \frac{(I_{\phi 1} W)^2 R_1}{DU} \Delta b \right]^2} \right\} dx. \quad (6)$$

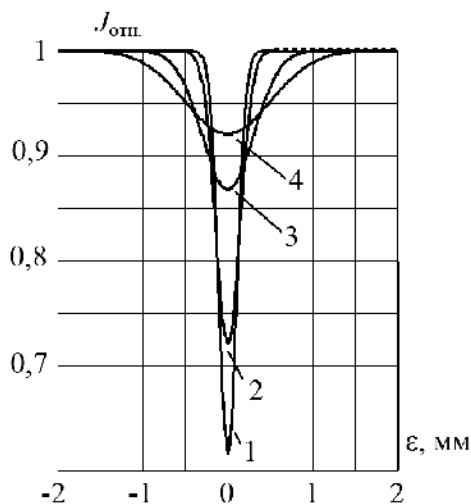


Рис. 5. Зависимость РИ от ε при различных токах расфокусировки: 1 - $\Delta I_{\phi} = 0$; 2 - $\Delta I_{\phi} = 0,1$; 3 - $\Delta I_{\phi} = 0,5$; 4 - $\Delta I_{\phi} = 1$ мА

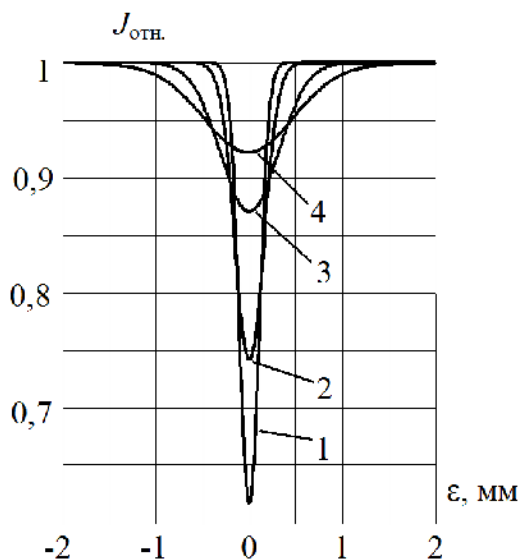


Рис. 6. Зависимость РИ от ε при различных уровнях свариваемых поверхностей относительно плоскости острой фокусировки: 1 - $\Delta b = 0$; 2 - $\Delta b = 5,3$; 3 - $\Delta b = 15$; 4 - $\Delta b = 40$ мм

Когда луч находится на стыке ($\varepsilon = 0$), то интенсивность рентгеновского излучения минимальна при минимальном радиусе луча, т. е. при $\Delta I_\phi = 0$ и $\Delta b = 0$ (рис. 5, 6). При этом относительное изменение интенсивности рентгеновского излучения при смещении луча относительно стыка максимально.

При расфокусировке луча ($\Delta I_\phi \neq 0$ и $\Delta b \neq 0$) относительное изменение интенсивности рентгеновского излучения уменьшается, ветви характеристик становятся более пологими. Можно сказать, что датчик рентгеновского излучения становится менее чувствительным к смещению луча относительно стыка.

Зависимости интенсивности рентгеновского излучения от степени расфокусировки (ΔI_ϕ) при различных положениях луча (ε) относительно стыка представлены на рис. 7. Характеристики рассчитаны по формуле (5) для электронно-лучевой пушки КЭП 2М при $\sigma_0 = \Delta = 0,1$ мм.

При больших значениях расфокусировки величина интенсивности рентгеновского излучения стремится к значению интенсивности излучения, возникающего на чистом металле (без зазора). Очевидно, что при смещении сфокусированного луча ($\Delta I_\phi = 0$) относительно стыка, интенсивность рентгеновского излучения повышается (рис. 7, кривые 2–5), но характер его изменения при расфокусировке не одинаков.

Когда смещение луча ε не превышает Δ , характеристики имеют экстремум-минимум в точке $\Delta I_\phi = 0$ (кривые 1, 2), т. е. значение интенсивности излучения минимально при сфокусированном луче.

Если смещение $\varepsilon > \Delta$, то при $\Delta I_\phi = 0$ интенсивность оказывается больше, чем в окрестностях этой точки. При расфокусировке она начинает уменьшаться, а затем увеличиваться до максимального значения (кривые 3–5). Это можно объяснить следующим образом. Когда луч смещен на величину $\varepsilon < \Delta$, то большая часть электронов, попадая в зазор, не участвует в создании рентгеновского излучения. При расфокусировке эта часть электронов уменьшается, и поэтому интенсивность излучения сразу начинает возрастать. Если же луч смещен на величину, превышающую Δ ($\varepsilon > \Delta$), то в этом случае большая часть электронов участвует в создании рентгеновского излучения. Когда диаметр луча начинает увеличиваться, возрастает число электронов, попадающих в зазор, и интенсивность излучения начинает уменьшаться. При дальнейшей

расфокусировке количество электронов, попадающих на поверхность изделия возрастает быстрее, чем количество электронов, проникающих в зазор, и интенсивность излучения возрастает.

Явление изменения интенсивности излучения при расфокусировке луча можно использовать для контроля и управления положением фокуса луча относительно поверхности свариваемых деталей.

С другой стороны, необходимо учитывать это явление при реализации средств позиционирования луча по стыку. Из графиков видно, что заметные изменения интенсивности излучения происходят уже при токах расфокусировки, составляющих доли 1 мА. Поэтому нестабильность тока фокусирующей системы может стать причиной ложных «срабатываний» – изменение интенсивности рентгеновского излучения в то время, когда положение луча относительно стыка постоянно.

В связи с этим представляет интерес возможность определения причины изменения интенсивности рентгеновского излучения (изменение положения луча или изменение положения острой фокусировки луча). Такую возможность дает, например, частотная селекция сигнала рентгеновского датчика при наличии в параметрах электронного луча периодических составляющих с известными частотами.

Максимальное относительное изменение интенсивности рентгеновского излучения при перемещении луча относительно стыка может служить критерием фокусировки луча на поверхности свариваемых деталей при регистрации излучения без оплавления кромок, а также критерием максимальной чувствительности датчика к перемещению луча относительно стыка.

Полученные соотношения, определяющие связь тока фокусирующей системы с параметрами луча, позволили произвести анализ зависимости интенсивности рентгеновского излучения от изменения тока фокусировки и уровня поверхности свариваемых деталей.

Явление изменения интенсивности рентгеновского излучения при изменении уровня фокусировки луча можно использовать для контроля и управления положением фокуса луча относительно поверхности свариваемых деталей, однако необходимо различать причину изменения интенсивности, чтобы осуществлять управление по требуемому параметру (по положению луча, фокуса, диаметру луча).

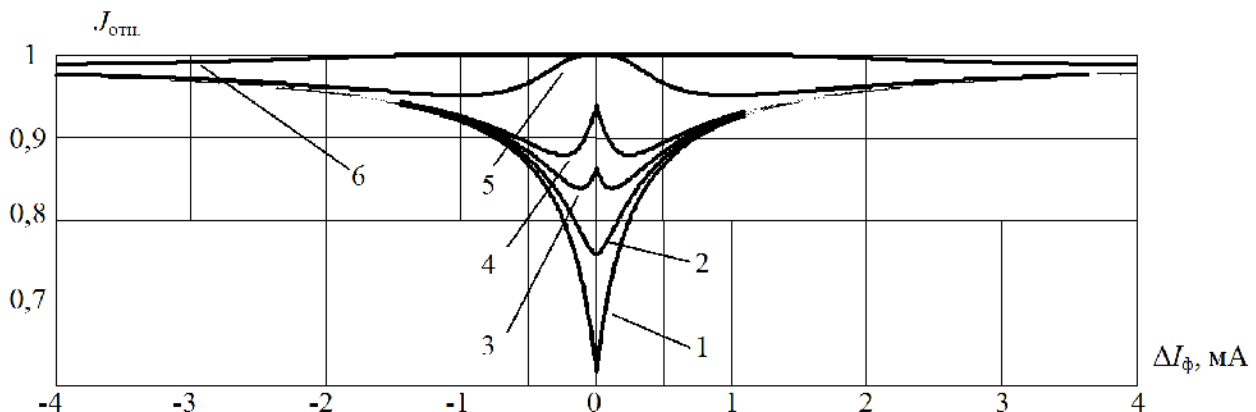


Рис. 7. Зависимость РИ от степени расфокусировки при различных положениях ε электронного луча относительно стыка:

1 – $\varepsilon = 0$; 2 – $\varepsilon = 0,1$; 3 – $\varepsilon = 0,15$; 4 – $\varepsilon = 0,2$; 5 – $\varepsilon = 0,5$; 6 – $\varepsilon = 2$ мм

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 размеростатичного 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