

УДК 621.372.822

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА И ТЕМПЕРАТУРОРАЗМЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ВОЛНОВОДОВ КВЧ-ДИАПАЗОНА

Трифанов В.И., Оборина Л.И., Суханова О.А., Мелкозеров М.Г., Трифанов И.В.

*ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М.Ф. Решетнева», Красноярск, e-mail: sibgau-uks@mail.ru*

При изготовлении труб волноводов КВЧ-диапазона сечением 2,4×1,2 мм с точностью 0,015 мм и шероховатостью поверхности Ra 0,2–0,32 мкм из сплава 32НКД использован метод многостороннего деформирования. Представлены результаты исследования напряженно-деформированного состояния труб волноводов КВЧ-диапазона при изготовлении их методом многостороннего деформирования, зависимости напряжений в очагах деформации при изготовлении волновода, а также зависимость силы протягивания заготовок трубы волновода F_p от напряжений деформации. Определены зависимости относительного удлинения d/l_0 и коэффициента линейного расширения (ТКЛР) α образца трубы волновода сечением 1,2×2,4 мм от степени деформации, нагрева T и микроструктуры сплава 32НКД трубчатой заготовки, изготовленного из сплава 32НКД. Представлена принципиальная схема измерения температурного коэффициента линейного расширения трубы волновода с помощью индуктивного dilatометра DIL402C. Измерения микроструктуры образцов проводили с помощью метода оптической микроскопии на микроскопе Axio Observer Dlm с цифровой записью изображения. На основе проведенных исследований предлагается, что ϵ не должен превышать 0,2–0,25 на начальных этапах деформирования трубчатой заготовки волновода сечением 2,4×1,2 мм. На финишных этапах ϵ рекомендуется 0,02–0,01.

Ключевые слова: волновод, многостороннее деформирование, температурный коэффициент расширения, микроструктура

RESEARCH OF PROCESS PARAMETERS AND TEMPERATURE READING CHARACTERISTICS IN THE MANUFACTURE OF WAVEGUIDES OF EHF-BAND

Trifanov V.I., Oborina L.I., Sukhanova O.A., Melkozerov M.G., Trifanov I.V.

*Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk,
e-mail: sibgau-uks@mail.ru*

During production of pipes of waveguides of the EHF-range cross-section of 2.4×1.2 mm with an accuracy of 0.015 mm and a surface roughness Ra 0.2-0.32 μm from the alloy 32NKD method used multilateral deformation. The results of the study of the stress-strain state of HF waveguide tubes in the manufacture of their method of multilateral deformation, the dependence of stresses in the centers of deformation in the manufacture of waveguide, as well as the dependence of the pulling force of the tube waveguide F_p on strain stresses. The dependence of the elongation d/l_0 and the coefficient of linear expansion (CTE) α sample tube waveguide with cross-section of 1.2×2.4 mm the degree of deformation, heating T and the microstructure of the alloy 32NKD tubular billets made of alloy 32NKD. Schematic diagram of measurement of temperature coefficient of linear expansion of the pipe waveguide with inductive dilatometer DIL402C. Measurement of the microstructure of the samples was conducted using the method of optical microscopy on the microscope Axio Observer Dlm with a digital record of the image. On the basis of the conducted research suggest that ϵ should not exceed 0.2-0.25 at the initial stages of deformation of a tubular piece of waveguide with a cross section of 2.4×1.2 mm At the finishing stages it is recommended that ϵ 0.02-0.01.

Keywords: the waveguide, the multi-lateral deformation, thermal expansion coefficient, microstructure

Актуальной является разработка эффективных методов изготовления волноводов, работающих в КВЧ-диапазоне, из терморазмеростабильных материалов, например, сплава 32НКД, обеспечивающего низкий температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) $(1 \div 2) \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ [1, 2]. В связи с отмеченным требуется разработка современных способов изготовления волноводов, позволяющих сохранить низкий ТКЛР в заданных пределах, а также методов контроля [3–5].

При изготовлении труб волноводов КВЧ-диапазона сечением 2,4×1,2 мм с точностью 0,015 мм и шероховатостью поверхности Ra 0,2–0,32 мкм из сплава

32НКД может быть использован метод многостороннего деформирования (МД). Процесс изготовления труб волноводов заключается в обжатии трубчатой заготовки роликовой фильерой к поверхности инструмента-дорна прямоугольного сечения, установленного внутри канала, затем продольном протягивании трубчатой заготовки. При этом за несколько циклов обжатия и протягивания формируется волноводный канал. Между циклами обжатия и протягивания может производиться отжиг в защитной среде аргона трубчатой заготовки волновода для снятия напряжений пластической деформации и восстановления микроструктуры [3, 4].

Качество изготовления элементной базы антенно-фидерных устройств (АФУ) требует оценки напряженно-деформированного состояния труб волноводов после их изготовления методом многостороннего деформирования.

Цель исследования: оценка влияния следующих факторов напряженно-деформированного состояния: степени деформации трубчатой заготовки на температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР), параметров деформации и нагрузки на микроструктуру материала канала волновода [5], а также способов термообработки на микроструктуру сплава 32НКД, после проведения пластической деформации.

Материалы и методы исследования

Схема процесса изготовления труб волноводов методом многостороннего деформирования при помощи роликовой фильеры показана на рис. 1, она может быть использована для расчета напряжений в зоне деформации, например σ_x , усилия в хвостовике инструмента-дорна F_v .

Напряжение σ_x в зоне деформации роликовой фильерой трубчатой заготовки волновода может быть рассчитано по формуле [6]:

$$\frac{d\sigma_x}{dx} + \sigma_x \left(c + \frac{dh}{dx} \right) = fc(\epsilon_x - \epsilon_y), \quad (1)$$

где dh – величина обжатия стенки трубчатой заготовки волновода; $f = \sigma_i / \epsilon_i$ – функция пластичности; ϵ_x – степень деформации, ϵ_x и ϵ_y – по осям x и y ; c – коэффициент, зависящий от степени деформации трубчатой заготовки и коэффициентов трения, при продольном протягивании трубчатой заготовки волновода.

На графике (рис. 2) представлены зависимости напряжений σ_x в сечениях очага деформации трубчатой заготовки, изготовленной из сплава 32НКД, роликовой фильерой (в зоне А–В рис. 1). Зона А–В составляла 12 мм, расчет производился через каждые 3 мм.

Выполненные расчеты по определению напряжений в сечениях очага деформации волновода показали, что σ_x зависит от величины обжатия и координаты очага деформации волноводов сечением $2,4 \times 1,2$ мм распределения напряжений носят нелинейный характер (рис. 2). Расчетным путем было установлено, что при изготовлении волноводов сечением $2,4 \times 1,2$ мм напряжение в центре деформации может достигать 350 МПа.

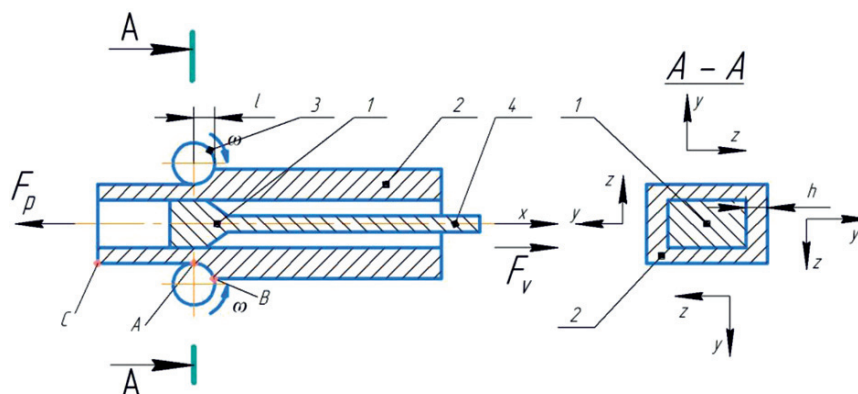


Рис. 1. Схема процесса изготовления труб волноводов, примененная для расчета напряжений в зоне деформации: 1 – инструмент-дорн, 2 – трубная заготовка, 3 – ролики регулируемой четырехроликовой фильеры, 4 – хвостик инструмента-дорна

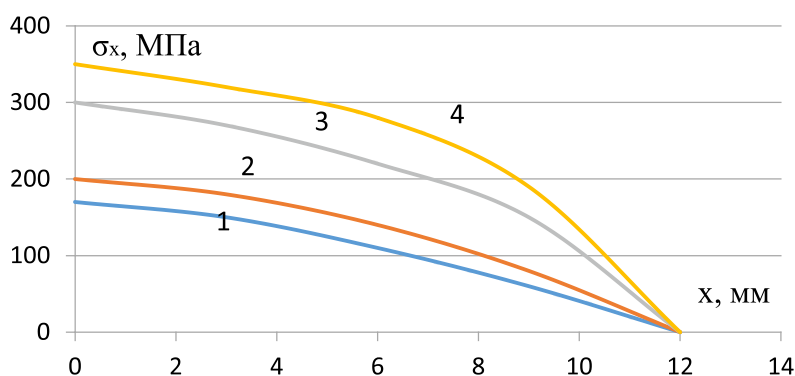


Рис. 2. Напряжения σ_x в сечениях очага деформации при изготовлении волновода из сплава 32НКД сечением $2,4 \times 1,2$ мм, и различным обжатием Δ : 1 – 0,005 мм; 2 – 0,01 мм; 3 – 0,015 мм; 4 – 0,2

В процессе деформирования с ростом степени деформации ϵ и напряжения в зоне деформации σ_x возрастают твердость, временное сопротивление σ_b в трубчатой заготовке волновода. Закон постоянства объема сохраняется, т.е. $V_0 = V_1$, а длина увеличивается на ΔL :

$$\Delta L = L_1 - L_0, \quad (2)$$

где L_1, L_0 – конечная и начальная длина трубы волновода, V_0 – начальный объем трубчатой заготовки, V_1 – объем трубчатой заготовки после деформирования и протягивания; $F_p = F_v$, где F_p – сила протягивания заготовки волновода, F_v – продольная сила в инструменте-дорне.

При этом усилии протягивания заготовки трубы волновода F_p и, действующее на инструмент-дорн при протягивании трубы волновода, F_v может быть рассчитано по формуле

$$F_v = -\lambda k_{тр} \cdot p \cdot \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\sigma_y + \sigma_y^{i+1}}{2}, \quad (3)$$

где $\lambda = l / (n - 1)$, где l – длина очага деформации в зоне А-В (рис. 1); n – число узлов, в которых рассчитывались деформации σ_y ; $k_{тр}$ – коэффициент трения; p – периметр канала трубы волновода, σ_y – компонента тензора напряжений в стенке трубы волновода.

Напряжение σ_x на участке СА можно определить по формуле

$$\delta_x = \frac{F_p}{S_{(y,z)}},$$

где $S_{(y,z)}$ – площадь поперечного сечения трубы волновода по оси x ; F_p – сила протягивания заготовки трубы волновода [7]. Зависимость силы протягивания от напряжения σ_x для различных материалов представлена на рис. 3.

При больших пластических деформациях уменьшение площади сечения $S^{k-1} \rightarrow S^k$ на различных этапах деформирования и протягивания трубчатой заготовки пропорционально удлинению в направлении оси x . В связи с этим ϵ_x^k степень деформации по оси x можно рассчитать по формуле

$$\epsilon_x^k = \ln \left(\frac{S_x^k}{S_x^{k-1}} \right) + \epsilon_x^{k-1}, \quad (4)$$

где S_x^k и S_x^{k-1} – соответственно площади поперечного сечения трубы волновода после k -ой и $(k-1)$ -ой протяжек.

Радиальные и тангенциальные напряжения σ_y и σ_z могут быть рассчитаны с учетом физических соотношений

$$\left. \begin{aligned} \sigma_z &= \sigma_x + f(\epsilon_z - \epsilon_x) \\ \sigma_y &= \sigma_x - f(\epsilon_x - \epsilon_y) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Метод многостороннего деформирования связан с пластической деформацией трубчатой заготовки волновода и может влиять на ТКЛР сплава 32НКД.

Влияние пластической деформации на коэффициент температурного расширения (ТКЛР) описывается соотношением [4]:

$$\alpha = \alpha_0 \cdot (1 + A\epsilon), \quad (6)$$

где α_0 – коэффициент линейного расширения недеформированного металла; A – коэффициент, ϵ – степень деформации.

Коэффициент A может быть определен по формуле

$$A = \chi_T \cdot E \cdot \gamma / 3, \quad (7)$$

где E – модуль упругости, γ – параметр Грюнайзена, χ_T – изотермическая сжимаемость.

Известно, что сплав 32НКД имеет следующие основные характеристики (табл. 1), при этом A может находиться в пределах 1,3÷2,3 [4].

При этом степень деформации определялась по формуле

$$\epsilon = \frac{\Delta h}{h_0} = \frac{S_0 - S_1}{S_0},$$

где Δh – величина обжатия стенки трубчатой заготовки, h_0 – первоначальная толщина стенки трубчатой заготовки, S_0, S_1 – соответственно площадь сечения исходной и протянутой заготовок.

На графике рис. 5 представлена зависимость ТКЛР (α) от изменения температуры нагрева T трубчатой заготовки, изготовленной из сплава 32НКД сечением 2,4×1,2 мм методом многостороннего деформирования.

При выборе рациональных параметров процесса многостороннего деформирования необходимо учитывать изменение механических свойств сплава 32НКД (табл. 1), а также их влияние на ТКЛР, после каждого цикла обжатия, протягивания трубчатой заготовки волновода и термообработки для снятия остаточных напряжений [3].

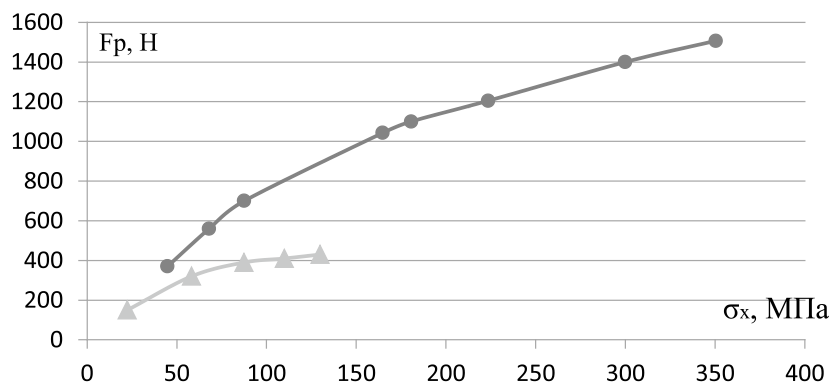


Рис. 3. Зависимость силы протягивания заготовок трубы волновода F_p от напряжения σ_x деформации: ● – для сплава 32НКД; ▲ – для меди М1; сечение трубы волновода 2,4×1,2 мм

Механические свойства сплава 32НКД

НВ	σ_T , МПа	σ_b , МПа	δ , %	$E \cdot 10^{-5}$, МПа	$\alpha_{cp} \cdot 10^{-6}$, K ⁻¹ (20–100 °С)
129	299	451	41	1,44	1

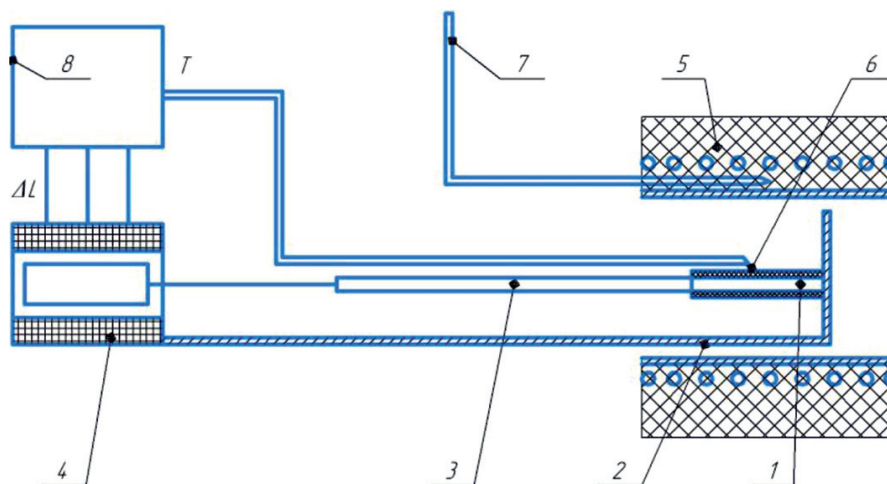


Рис. 4. Принципиальная схема измерения α трубы волновода при помощи дилатометра DIL402C (Netzsch): 1 – образец волновода, 2 – трубчатый держатель, 3 – толкатель, 4 – индуктивный датчик, 5 – печь, 6 – термопара образца, 7 – термопара печи, 8 – цифро-аналоговый преобразователь сигналов

При изготовлении трубы волновода малого сечения $2,4 \times 1,2$ мм были проведены замеры α от изменения температуры и степени деформации $\varepsilon = 0,2 \pm 0,25$.

Измерение температурного коэффициента линейного расширения трубы волновода сечением $2,4 \times 1,2$, изготавливаемой из сплава 32НКД, осуществлялось с помощью индуктивного дилатометра DIL402C фирмы Netzsch, принципиальная схема которого представлена на рис. 4. Калибровку дилатометра осуществляли корундовым стандартом фирмы Netzsch. Измеряемые образцы имели форму параллелепипеда с размерами $3,6 \times 3,6$ и $2,4 \times 1,2$ мм, длиной $25 \pm 0,05$ мм. Измерение ТКЛР проводили со скоростью 5 К/мин в интервале температур от 20 до 140 °С в среде аргона.

Образец волновода (рис. 4) находился в гомогенной области температурного поля печи. Печь нагревалась и охлаждалась по заданной программе. Управление температурой печи осуществлялось термопарой 7. Температура образца измеряется термопарой 6. Через толкатель изменение длины механически передавалось на индуктивный датчик смещения длины 4.

Сердечник перемещался в катушке датчика. Возникающее в результате изменение напряжения посредством усилителя электронного блока преобразуется в напряжение постоянного тока. Изменение напряжения пропорционально смещению сердечника индуктивного датчика и, таким образом, измеряет изменение длины образца. Измеряемые сигналы (изменение длины, температура образца) регистрируются компьютером с построением графиков $\alpha = f(T)$, $dL/L_0 = f(T)$ (рис. 5). Нагрев производился в защитной среде аргона.

Результаты исследования и их обсуждение

Установлено, после механической деформации $\varepsilon = 0,2$ трубы волновода из сплава 32НКД возрастает ТКЛР α до 1,5–1,6 раз при росте температуры до 100 °С, причем рост α зависит от степени деформации ε и микроструктуры сплава 32НКД.

Рентгеноструктурный анализ сплава 32НКД, проведенный с применением рентгеновского аппарата УРС-20, позволил определить структуру и микронапряжения, возникающие при изготовлении труб волноводов методом многостороннего деформирования. Фотографический метод регистрации дифракционной картины осуществлялся при следующих условиях и режимах съемки: излучение FeK α , напряжение 26 кВ, ток трубки 19 мА, экспозиция 60 мин. Съемка плоского шлифа осуществлялась в камере Дебая (РКД) диаметром 57,3 мм. Рентгеноструктурным анализом было установлено, что структура сплава 32НКД в исходном состоянии – рекристаллизованная, структура образцов после деформирования характеризуется ориентацией зерен в направлении протяжки [7]. На рентгенограммах, снятых с поверхности, наблюдается расширение линий, что является следствием микронапряжений, вызванных деформацией кристаллов в процессе многостороннего деформирования и протягивания трубчатой заготовки волновода.

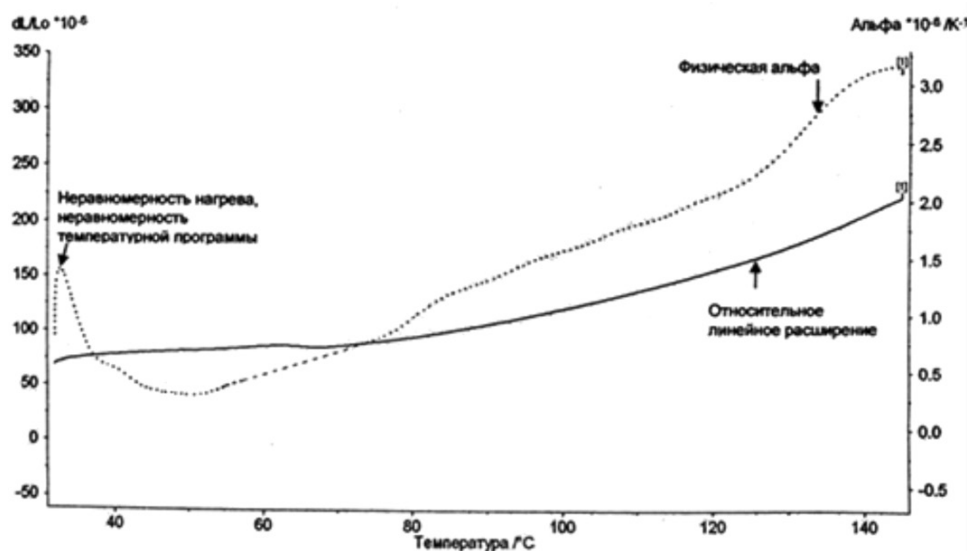


Рис. 5. Термическое расширение волновода сечением $2,4 \times 1,2$ мм, степень деформации $\varepsilon = 0,2$

Твердость сплава 32НКД и деформации возрастают в результате многостороннего деформирования и наклепа [6]. В промежутках между операциями производилась термообработка в вакууме для сохранения пластических свойств материала и устранения образования микротрещин, а также исключения образования окалины и предупреждения повреждения поверхности инструмента-дорна. Режимы двух циклов термической обработки волновода сплава 32НКД были выбраны при температурах 650°C , 830°C и час охлаждения на 50 град/ч, 880°C . Оба цикла термической обработки не привели к получению изотропного поликристаллического состояния сплава трубчатой заготовки волновода.

Отжиг не обеспечивает полного завершения рекристаллизационных процессов и не изменяет существенно коэффициент линейного расширения в сторону уменьшения. Измерения микроструктуры образцов проводили с помощью метода оптической микроскопии на микроскопе Axio Observer Dlm с цифровой записью изображения.

Заключение

На основе проведенных исследований предлагается при проектировании операций деформации (при изготовлении), что ε не должен превышать $0,2-0,25$ на начальных

этапах деформирования трубчатой заготовки волновода сечением $2,4 \times 1,2$ мм. На финишных этапах ε рекомендуется $0,02-0,01$.

Список литературы

1. Вишневский В., Фролов С., Шахнович И. Миллиметровый диапазон как промышленная реальность стандарт IEEE 802.15.3С и спецификация WirelessHD // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2010. № 3. С. 70–79.
2. Сплавы с минимальным температурным коэффициентом линейного расширения [Электронный ресурс]. URL: <http://azbukametalla.ru/marochnik/pretsizionnye-splavy/> (дата обращения: 20.08.2018).
3. Афанасьев В.К., Попова М.В., Гладышев С.А., Герцен В.В., Обухов Г.В., Горшенин А.В. Инвары: учеб. пособие. Новокузнецк: СибГИУ, 2006. 126 с.
4. Шаров Г.А. Волноводные устройства сантиметровых и миллиметровых волн. М.: Горячая линия-Телеком, 2016. 639 с.
5. Халиманович В.И., Михнёв М.М., Наговицин В.Н., Гоцелок О.Б., Сильченко П.Н., Кудрявцев И.В. О напряженно-деформированном состоянии в открытом космосе конструкций волноводно-распределительных систем // Решетневские чтения. 2013. № 17 [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-napryazhenno-deformirovannom-sostoyanii-v-otkrytom-kosmose-konstruktsiy-volnovodno-raspre-delitelnyh-sistem> (дата обращения: 15.10.2018).
6. Малинин Н.Н. Технологические задачи пластичности и ползучести: учебное пособие для бакалавриата и магистратуры. 2-е изд., испр. и доп. М.: Издательство Юрайт, 2018. 121 с.
7. Трифанов И.В., Трифанов В.И., Оборина Л.И. Технологическое обеспечение качества при изготовлении линий передачи энергии антенно-фидерных устройств. 2-е изд., перераб. Красноярск: Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т, 2009. 242 с.