

Авиационная и ракетно-космическая техника

УДК 629.783

doi: 10.18698/0536-1044-2021-12-53-61

Анализ технологичности деталей гибких волноводных секций космического аппарата

С.В. Косьяненко¹, Е.В. Патраев¹, В.В. Петрусев¹, И.В. Трифанов²¹ АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва² Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва

Analysis of Fabricability of Flexible Waveguide Parts for Satellite Applications

S.V. Kosyanenko¹, E.V. Patraev¹, V.V. Petrusev¹, I.V. Trifanov²¹ ISS-Reshetnev Company² Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

В состав бортовой аппаратуры космических аппаратов входят волноводные линии передачи. Одной из задач, требующих решения, является температурная развязка волноводного тракта и приборов бортовой аппаратуры. В целях предотвращения деформации волноводного тракта при расширении/сжатии вследствие температурного воздействия волновод оборудован гибкой волноводной секцией, способной изменять длину без ухудшения радиотехнических характеристик. Рассмотрены вопросы технологии изготовления деталей гибких волноводных секций, касающиеся требований по структуре, свойствам, термической обработке исходных материалов, размерам заготовок, оборудованию и оснастке. Предложены оптимизированные и апробированные на практике операции технологического процесса вытяжки деталей из листового материала, раскатки, профилирования и формования, позволяющие изготавливать детали волноводных трактов необходимого качества.

Ключевые слова: гибкие волноводные секции, бериллиевая бронза, технологичность деталей, технологический процесс

Satellite onboard equipment includes waveguide transmission lines. One of the tasks to be solved is the temperature decoupling of the waveguide path and onboard equipment devices. In order to prevent waveguide path deformation during expansion/contraction due to thermal effects, the waveguide is equipped with a flexible waveguide section capable of changing the length without deteriorating radio technical characteristics. The paper considers the issues of fabrication of flexible waveguide parts, concerning the requirements for structure, properties, heat treatment of raw materials, dimensions of workpieces, equipment, and tooling. Within the study, we optimized and tested in practice operations of the technological process of extracting parts from sheet material, rolling, profiling, and shaping, which make it possible to manufacture parts of waveguide paths of the required quality.

Keywords: flexible waveguide sections, beryllium bronze, fabricability of parts, technological process

Задачи развития информационных спутниковых систем с перспективными космическими аппаратами связи и телекоммуникации требуют применения бортовых антенно-фидерных устройств с улучшенными эксплуатационно-техническими характеристиками, зависящими от качества гибких волноводных секций (ГВС). ГВС, предназначенные для передачи электромагнитной энергии, представляют собой полые тонкостенные детали прямоугольного сечения с гофрированными стенками, выполненные методом вытяжки из листовой бериллиевой бронзы [1, 2].

Благодаря высоким прочностным и упругим свойствам, релаксационной и коррозионной стойкости, электро- и теплопроводности бериллиевые бронзы используют для изготовления изделий специального назначения, к которым относятся ГВС.

Цель работы — разработка и внедрение в производство оптимальной технологии вытяжки деталей ГВС, включающей в себя термическую обработку бериллиевой бронзы, выбор скорости охлаждения, технологию вытяжки из листового материала, определение размера заготовки и числа переходов для вытяжки, выбор оборудования и оснастки для вытяжки, раскатки и формовки.

Общие свойства бериллиевой бронзы. В АО «Информационные спутниковые системы» им. академика М.Ф. Решетнёва» (далее АО «ИСС») ГВС изготавливают из ленты бериллиевой бронзы БрБ2 по ГОСТ 1789–2013. К рабочим поверхностям ГВС предъявляют следующие требования: минимальная шероховатость внутренней поверхности ($Ra = 0,25$ мм); отсутствие забоин, вмятин, трещин, заусенцев и любых дефектов, выступающих за пределы заданной шероховатости.

В процессе эксплуатации при достижении циклической надежности материал ГВС должен иметь зерна размером до 40 мкм и равномерное распределение в микроструктуре включений β -фазы. Размер зерна достигается его дроблением путем термообработки (закалки) и вытяжки заготовки, что приводит к делению крупных зерен на более мелкие.

Для получения мелкого зерна при нагреве до температуры закалки в структуре бронзы должно сохраняться некоторое количество равномерно распределенных включений избыточной β -фазы, которые препятствуют собира-

Таблица 1

Химический состав безоловянной бериллиевой бронзы БрБ2, обрабатываемой давлением

Компонент	Содержание, мас. %
Be	1,80...2,10
Ni	0,20...0,50
Cu	96,90...98,00
Si	Не более 0,15
Al	Не более 0,15
Pb	Не более 0,05
Fe	Не более 0,15

тельной рекристаллизации α -твердого раствора [3, 4].

Химический состав безоловянной бериллиевой бронзы БрБ2, обрабатываемой давлением, приведен в табл. 1 [4, 5], где Si, Al, Pb, Fe — примеси.

Оптимальными свойствами обладают сплавы, содержащие около 2,0...2,5 % бериллия. При дальнейшем увеличении содержания Be в безоловянной бронзе БрБ2 ее прочностные свойства повышаются незначительно, а пластичность становится чрезмерно малой.

Термическая обработка безоловянной бериллиевой бронзы. Предельная растворимость бериллия в системе Cu — Be при температуре 870 °С составляет 2,7 % (по массе), и она резко уменьшается с понижением температуры. Это указывает на возможность применения упрочняющей термообработки медно-бериллиевых сплавов. Бериллиевые бронзы являются дисперсионно-твердеющими сплавами, которые среди прочих сплавов на медной основе имеют максимальное упрочнение при термической обработке. Их подвергают закалке и старению.

При термической обработке бериллиевой бронзы важно выбрать температуру нагрева под закалку $T_{\text{зак}}$. Ее значение определяет полностью перевода легирующих элементов в твердый раствор и возможность его гомогенизации. Температура нагрева под закалку составляет 760...800 °С, поэтому выше указанных значений бронзу нагревать не следует из-за опасности роста зерен и ухудшения эксплуатационных характеристик [4, 6, 7].

Скорость охлаждения. Важным параметром закалки является скорость охлаждения, кото-

рая должна быть достаточно высокой, чтобы исключить распад пересыщенного раствора. При выборе закалочных сред руководствуются критическими значениями скорости закалки, оцениваемыми с помощью термокинетических диаграмм или диаграмм изотермического превращения переохлажденного α -раствора.

Анализ данных показывает, что при закалке бериллиевых бронз наибольшая скорость охлаждения должна находиться в интервале температур 550...250 °С. Критическая скорость охлаждения бериллиевых бронз составляет 30...60 °С/с, поэтому их обычно закалывают в воде [6, 7].

Технология процесса вытяжки из листового материала. Вытяжку, представляющую собой процесс превращения плоской заготовки в полую деталь любой формы (или дальнейшее изменение ее размеров), выполняют на вытяжных штампах [8]. В АО «ИСС» применяют прямую вытяжку с утонением стенок детали осесимметричной формы.

При изготовлении листовой штамповкой пространственных деталей заготовка обычно испытывает значительные пластические деформации, что вынуждает предъявлять к ее материалу достаточно высокие требования по пластичности.

Вытяжка происходит за счет пластической деформации, сопровождаемой смещением значительного объема металла в высоту. При большой степени деформации (что соответствует глубокой вытяжке) и небольшой толщине материала смещенный объем становится причиной образования гофров на деформируемой заготовке.

Основным критерием, определяющим способность материала к вытяжке, служит ее предельный коэффициент. Предельным коэффициентом вытяжки считается тот, при котором еще не происходит разрыва заготовки, но дальнейшее незначительное увеличение ее диаметра приведет к разрыву штампуемого материала. При большой степени деформации или в случае образования складок на заготовке растягивающие напряжения в опасном сечении приводят к отрыву дна.

Главное направление рационального построения или улучшения процесса вытяжки заключается в создании наиболее благоприятных условий деформирования металла с целью снижения растягивающих напряжений в опас-

ном сечении: повышении прочности металла в этом сечении, уменьшении напряжений в начальной стадии вытяжки, снижении сопротивления плоского фланца деформированию и тангенциальных напряжений сжатия в деформируемом фланце.

В технологическом отношении способы вытяжки различают главным образом по виду напряженного состояния деформируемой части заготовки. Технологический процесс вытяжки включает в себя:

- подготовку заготовок к прессованию;
- термическую обработку деталей;
- гальваническую операцию (снятие окислыны);
- настройку прессы и штампа;
- смазку деталей;
- установку деталей на штампе;
- непосредственно вытяжку.

К достоинствам листовой штамповки (вытяжки) относятся:

- получение деталей минимальной массы при заданных значениях прочности и жесткости;
- достаточно высокая точность размеров и качество поверхности, позволяющие сократить до минимума отделочные операции обработки резанием;
- сравнительная простота механизации и автоматизации процессов штамповки, обеспечивающая высокую производительность.

Теоретическое описание определения размера заготовки. Правильное определение размеров и формы плоской заготовки для вытяжки полых деталей позволяет наиболее полно использовать вытяжку и уменьшить размеры листового материала.

При вытяжке с утонением стенок определение размеров заготовки проводят исходя из равенства объемов материала заготовки и готовой детали с прибавкой на обрезку.

При реальной вытяжке возникают погрешности, не учитываемые расчетными формулами, связанные с неравномерностью толщины проката, зазором и слоем смазки, прижимом заготовки; анизотропией механических свойств, фиксацией заготовки в штампе и др. В результате вытянутая деталь требует дополнительной обработки.

Расчетные формулы не отражают технологических особенностей вытяжки, в частности, фактического утонения металла. При вытяжке

Таблица 2

**Результаты расчета размера заготовки
и числа переходов вытяжки**

Номер перехода	Диаметр пуансона, мм	Диаметр матрицы, мм	Высота детали, мм
I	22,80	25,70	20
II	33,00	35,60	31
III	26,00	28,40	43
IV	20,00	22,20	59
V	18,00	19,80	75
VI	17,00	18,40	87
VII	16,85	18,05	93
VIII	16,76	17,76	110

Примечание. Отклонение диаметра пуансона составляет $-0,01$ мм, диаметра матрицы — $+0,01$ мм, высоты — ± 2 мм.

(как в начальной стадии, так и в конечной) вследствие утонения материала происходит увеличение площади поверхности заготовки, не учитываемое расчетными формулами [9].

На примере ГВС сечением $19 \times 9,5$ мм проведены расчеты размера заготовки и числа переходов вытяжки с утонением толщины заготовки с 1,3 до 0,5 мм (табл. 2).

Вытяжка детали из бронзы БрБ2 сопровождается сильным наклепом металла. В процессе холодной деформации происходит структурно-фазовое превращение, которое требует промежуточных термических операций (заковки) и применения специальной фторопластовой смазки.

При распылении фторопластовой смазки на поверхности образуется тонкий равномерный и почти прозрачный слой ультрадисперстного фторопласта. Полученное покрытие обладает очень высокими антифрикционными свойствами, позволяющими значительно снизить трение для любых сочетаний материалов.

Число переходов для вытяжки. В зависимости от соотношения высоты и диаметра вытягиваемой детали, а также от относительной толщины заготовки, вытяжку можно осуществить за одну или несколько операций [9]. Вытяжка должна быть проведена за наименьшее число переходов, выполняемых с наибольшей степенью деформации [9].

При вытяжке с утонением стенок число операций (переходов) определяют по допустимой степени деформации (см. табл. 2).

При технологическом расчете вытяжки с утонением можно использовать ее коэффициент, который для бронзы составляет $0,75 \dots 0,85$ в зависимости от утонения стенок детали и уменьшения диаметров за один переход. Чем более резко происходит вытяжка с утонением, тем более высокий коэффициент следует применять.

Оборудование и оснастка для вытяжки. Помимо правильного расчета диаметра заготовки и числа переходов необходимо выбрать оснастку и оборудование исходя из расчетов и опыта работы.

Выполненные расчеты усилия пресса, которое напрямую зависит от диаметра и толщины детали, предела прочности на растяжение и коэффициента, учитывающего дополнительное усилие, позволили выбрать гидравлический одностоечный пресс усилием 250 кН [9] (рис. 1).

**Техническая характеристика
гидравлического одностоечного пресса**

Номинальное усилие, кН	250
Наибольший ход штока, мм	500
Скорость хода штока, мм/с, не менее:	
холостого	125
рабочего	20
возвратного	300
Размеры запрессованного стола, мм:	
слева направо	630
спереди назад	480
Расстояние от оси штока до станины, мм, не менее	250
Ширина проема в столе	160
Габаритные размеры, мм:	
слева направо	1600
спереди назад	1780
высота	2235

В АО «ИСС» для изготовления деталей типа колпачок (рис. 2), являющихся полуфабрикатом ГВС, применяют простые однооперационные вытяжные штампы (рис. 3).

Радиус закругления рабочей грани матрицы 9 обеспечивает плавность превращения круглой листовой заготовки в колпачок. При вытяжке изделия пуансоном 7 плоская часть заготовки (фланец) может свертываться с образованием складок. Для предотвращения этого явления используют прижимные кольца 8.

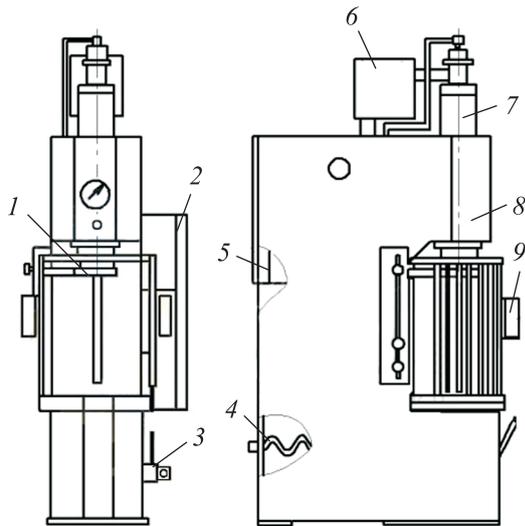
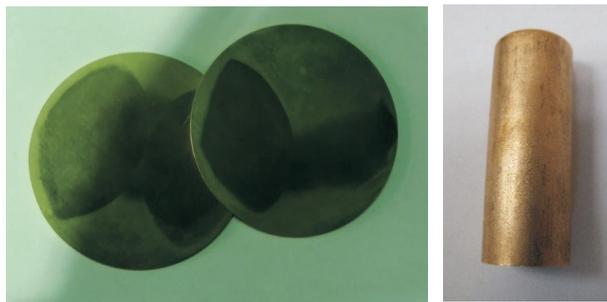


Рис. 1. Схема гидравлического одностоечного прессы:

- 1 — ползун; 2 — шкаф управления с электрооборудованием;
- 3 — пульт; 4 — змеевик-маслоохладитель;
- 5 — гидроагрегат; 6 — бак наполнения; 7 — рабочий цилиндр; 8 — станина; 9 — фотозащита



а б

Рис. 2. Внешний вид образцов заготовки (а) и колпачка после вытяжки из листового материала (б)

Раскатывание поверхностей. Раскатывание цилиндрической поверхности шариковыми раскатками применяют для получения высокой точности размеров, утонения стенок заготовки путем увеличения длины и обеспечения высокого качества поверхности [9, 10].

При обработке поверхности шариками повышается долговечность и надежность получаемых деталей. Кроме того, при раскатывании происходит наклепывание поверхности, вследствие которого изменяются физические свойства поверхностных слоев металла, повышается твердость, создается более благоприятное распределение остаточных напряжений, увеличивается сопротивляемость кристаллических зерен разрушению и износостойкость.

Оборудованием для раскатывания поверхностей роликами, как правило, являются универсальные металлорежущие станки. При обработке наружных поверхностей вращения используют токарные, револьверные и карусельные станки. Процесс раскатки происходит при обильной подаче в зону обработки смазывающей жидкости и составляет обычно три-шесть проходов.

В рассматриваемом случае раскатку цилиндрических заготовок осуществляли на токарном станке, где длину стаканчика изменяли со 110 до 300 мм, а толщину стенки колпачка с 0,50 до 0,09...0,10 мм для последующего предварительного гофрирования ГВС.

Краткое описание технологического процесса изготовления трубочек.

Изготовление трубочек — сложный производственный процесс, на который влияют многие факторы: качество заготовок, получаемых из листового материала методом вытяжки; режимы, подобранные под

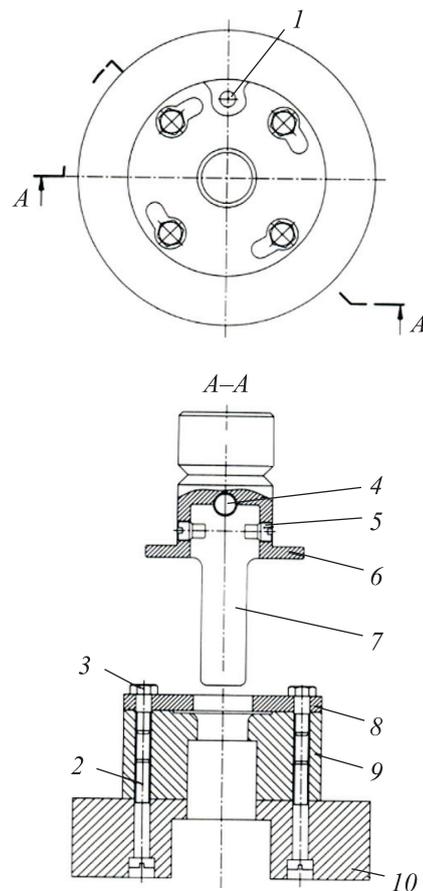


Рис. 3. Схема вытяжного штампа для первого перехода:

- 1, 3 — болты; 2 — втулка; 4 — съёмник; 5 — винт;
- 6 — хвостовик; 7 — пуансон; 8 — прижимное кольцо;
- 9 — матрица; 10 — нижняя плита



Рис. 4. Внешний вид приспособления и комплекта оснастки для раскатки на токарном станке



Рис. 5. Внешний вид заготовок (трубочек) после раскатки

каждый переход раскатки; термообработка детали и плавка материала.

Перед раскаткой растачивают кулачки под оправку, выставляют приспособление относительно оправки и проверяют биение вала, которое не должно превышать заданного по всей длине. Когда подготовительные работы закончены, колпачок устанавливают на оправку. Заготовку обжимают шариками с одинаковым и постоянным усилием прижима.

Раскатку выполняют за 5–7 циклов с промежуточными операциями термообработки и снятия окалины, образующейся вследствие теплового воздействия. Время между термической операцией и раскаткой ограничено из-за быстрого старения металла. При раскатке применяют смазку, которую подают непрерывно и непосредственно на деталь.

При изготовлении деталей используют приспособление и комплект оснастки для раскатки (рис. 4), устанавливаемые на токарный станок.

За пять циклов длина заготовки (рис. 5) увеличивается до 290...300 мм, а толщина стенки уменьшается с 0,50 до 0,09...0,10 мм. Шестой и седьмой циклы раскатки выполняют при необходимости (в зависимости от сечения детали).

Формовка стенок заготовки пуансоном. Перед предварительным гофрированием трубочку профилируют на оправке в прямоугольное сечение. Дальнейшую работу проводят на установке предварительного гофрирования заготовок для ГВС (рис. 6) с использованием комплекта оснастки для предварительного гофрирования.

При рабочем ходе силового штока пуансон давит на стенки профилированной заготовки, формируя ее в соответствии с поверхностью (конфигурацией) матриц.

Геометрические размеры поперечного сечения гофрированных секций, полученных таким способом, изменяются строго периодически. Чистота токонесущей поверхности не ухудшается в процессе гофрирования и определяется чистотой внутренней поверхности заготовки. Геометрия гофр остается практически постоянной на всей длине гофрированной волноводной секции.

Технологии сближения гофр на установке.

Для окончательного сближения гофр ГВС использована установка, схема которой показана на рис. 7.

Принцип работы установки заключается в том, чтобы из заготовки после предварительного гофрирования получить окончательную конфигурацию гибкой секции (рис. 8). Заготовку устанавливают на клиновую оправку, пред-



Рис. 6. Внешний вид установки предварительного гофрирования заготовок для ГВС

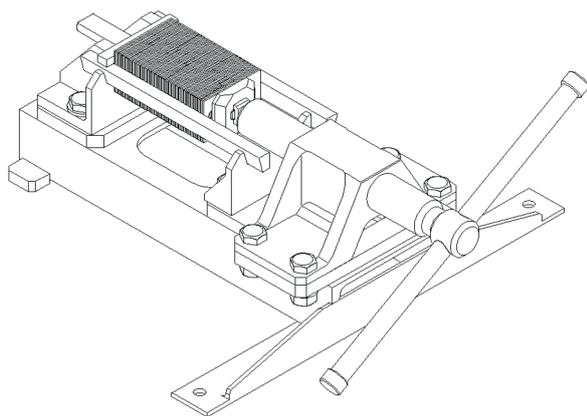


Рис. 7. Схема установки сближения гофр ГВС

варительно смазанную индустриальным маслом, затем поочередно заводят пластины в шахматном порядке и в одном направлении в предварительные гофры. Винтовым домкратом всю сборку поджимают до упора.

Обсуждение результатов исследования. Изготовление деталей типа ГВС является важным технологическим процессом, от которого зависит надежность эксплуатации изделий. Метод холодной листовой штамповки, раскатки и формовки деталей в полной мере обеспечивает выполнение требований, предъявляемых к волноводным линиям передачи, таких как:

- незначительные паразитные излучения и прием энергии;
- минимальные амплитудно- и фазово-частотные искажения;
- минимальные потери энергии;
- высокая электрическая и механическая прочность;

Литература

- [1] Тестоедов Н.А., ред. *Технология производства космических аппаратов*. Красноярск, СибГАУ, 2009. 352 с.
- [2] Таубкин М.Б., Цукерман С.А., Карпачев Д.Г. и др. *Цветные металлы и сплавы. Т. 1. Плоский прокат*. Москва, Металлургия, 1975. 216 с.
- [3] Циммерман Р., Гюнтер К. *Металлургия и материаловедение*. Москва, Металлургия, 1982. 480 с.
- [4] Арзамасов Б.Н., Макаров В.И., Мухин Г.Г. и др. *Материаловедение*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 648 с.
- [5] Берлин А.А., Ассовский И.Г., ред. *Перспективные материалы и технологии для ракетно-космической техники. Т. 3. Космический вызов XXI века*. Москва, Торус Пресс, 2007. 456 с.
- [6] Колачев Б.А., Ливанов В.А., Елагин В.И. *Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов*. Москва, Металлургия, 1972. 480 с.



Рис. 8. Внешний вид ГВС после сближения гофр

- большая широкополосность;
- передача энергии волной одного типа.

Выводы

1. Разработаны оптимизированные операции технологического процесса вытяжки деталей из листового материала, раскатки, профилирования и формования, позволяющие изготавливать детали волноводных трактов необходимого качества.

2. Предложенная технология производства деталей для ГВС успешно апробирована на практике в процессе изготовления волноводных трактов антенно-фидерных устройств современных и перспективных космических аппаратов, что позволяет рекомендовать ее разработчикам российской ракетно-космической техники.

- [7] Самохоцкий А.И., Парфеновская Н.Г. *Технология термической обработки металлов*. Москва, Машиностроение, 1976. 311 с.
- [8] Покровский Г.В., Давыдов Ю.П. *Листовая штамповка легированных сталей и сплавов*. Москва, Оборонгиз, 1962. 200 с.
- [9] Романовский В.П. *Справочник по холодной штамповке*. Москва, Машиностроение, 1979. 520 с.
- [10] Геллер Ю.А., Рахштадт А.Г. *Материаловедение*. Москва, Metallurgia, 1975. 447 с.

References

- [1] Testoedov N.A., ed. *Tekhnologiya proizvodstva kosmicheskikh apparatov* [Spacecraft production technology]. Krasnoyarsk, SibGAU Publ., 2009. 352 p. (In Russ.).
- [2] Taubkin M.B., Tsukerman S.A., Karpachev D.G., et al. *Tsvetnye metally i splavy. T. 1. Ploskiy prokat* [Nonferrous materials. Vol. 1. Flat products]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1975. 216 p. (In Russ.).
- [3] Zimmermann R., Gunther K. *Metallurgie und Werkstofftechnik*. Deutscher Verl. fr Grundstoffindustrie, 1997. (Russ. ed.: *Metallurgiya i materialovedenie*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1982. 480 p.)
- [4] Arzamasov B.N., Makarov V.I., Mukhin G.G., et al. *Materialovedenie* [Material engineering]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2008. 648 p. (In Russ.).
- [5] Berlin A.A., Assovskiy I.G., eds. *Perspektivnye materialy i tekhnologii dlya raketno-kosmicheskoy tekhniki. T. 3. Kosmicheskii vyzov XXI veka* [Novel materials and technologies for space rockets and space development. Vol. 3. Space challenges in XXI century]. Moscow, Torus Press Publ., 2007. 456 p. (In Russ.).
- [6] Kolachev B.A., Livanov V.A., Elagin V.I. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka tsvetnykh metallov i spлавov* [Metal science and thermal treatment of nonferrous materials]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1972. 480 p. (In Russ.).
- [7] Samokhotkiy A.I., Parfenovskaya N.G. *Tekhnologiya termicheskoy obrabotki metallov* [Thermal treatment technology for nonferrous materials]. Moscow Mashinostroenie Publ., 1976. 311 p. (In Russ.).
- [8] Pokrovskiy G.V., Davydov Yu.P. *Listovaya shtampovka legirovannykh staley i spлавov* [Stamping of alloy steels and doped alloys]. Moscow, Oborongiz Publ., 1962. 200 p. (In Russ.).
- [9] Romanovskiy V.P. *Spravochnik po kholodnoy shtampovke* [Handbook on cold forging]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979. 520 p. (In Russ.).
- [10] Geller Yu.A., Rakhshadt A.G. *Materialovedenie* [Material engineering]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1975. 447 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 02.06.2021

Информация об авторах

КОСЬЯНЕНКО Светлана Владимировна — инженер-технолог второй категории. АО «Информационные спутниковые системы» им. академика М.Ф. Решетнёва» (662972, Красноярский край, Железногорск, Российская Федерация, ул. Ленина, д. 52, e-mail: kosyanenko.sveta@mail.ru).

ПАТРАЕВ Евгений Валерьевич — заместитель генерального директора — начальник производства. АО «Информационные спутниковые системы» им. академика М.Ф. Решетнёва» (662972, Красноярский край, Железногорск, Российская Федерация, ул. Ленина, д. 52, e-mail: evpatraev@iss-rechetnev.ru).

Information about the authors

KOSYANENKO Svetlana Vladimirovna — Process Engineer of the second category. ISS-Reshetnev Company (662972, Krasnoyarsk Territory, Zheleznogorsk, Russian Federation, Lenina St., Bldg. 52, e-mail: kosyanenko.sveta@mail.ru).

PATRAEV Evgeny Valerievich — Deputy General Director for Production. ISS-Reshetnev Company (662972, Krasnoyarsk Territory, Zheleznogorsk, Russian Federation, Lenina St., Bldg. 52, e-mail: evpatraev@iss-rechetnev.ru).

ПЕТРУСЕВ Владимир Владимирович — начальник цеха 011. АО «Информационные спутниковые системы» им. академика М.Ф. Решетнёва» (662972, Красноярский край, Железногорск, Российская Федерация, ул. Ленина, д. 52, e-mail: irina@iss-rechetnev.ru).

PETRUSEV Vladimir Vladimirovich — Head of the shop 011. ISS-Reshetnev Company (662972, Krasnoyarsk Territory, Zheleznogorsk, Russian Federation, Lenina St., Bldg. 52, e-mail: irina@iss-rechetnev.ru).

ТРИФАНОВ Иван Васильевич — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технического регулирования метрологии. Сибирский государственный университет науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнёва (660037, Красноярский край, Красноярск, Российская Федерация, проспект им. Газеты Красноярский рабочий, д. 31, e-mail: Sibgau-uks@mail.ru).

TRIFANOV Ivan Vasilievich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of the Department of Technical Regulation of Metrology. Reshetnev Siberian State University of Science and Technology (660037, Krasnoyarsk Territory, Krasnoyarsk, Russian Federation, Krasnoyarskiy Rabochy Ave., Bldg. 31, e-mail: Sibgau-uks@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Косьяненко С.В., Патраев Е.В., Петрусев В.В., Трифанов И.В. Анализ технологичности деталей гибких волноводных секций космического аппарата. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2021, № 12, с. 53–61, doi: 10.18698/0536-1044-2021-12-53-61

Please cite this article in English as:

Kosyanenko S.V., Patraev E.V., Petrushev V.V., Trifanov I.V. Analysis of Fabricability of Flexible Waveguide Parts for Satellite Applications. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2021, no. 12, pp. 53–61, doi: 10.18698/0536-1044-2021-12-53-61



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям сборник тезисов конференции**

**«XLV Академические чтения
по космонавтике». Том 4**

В сборнике размещены материалы исследований актуальных проблем, относящихся к таким тематическим направлениям современной отечественной космонавтики, как научное наследие пионеров освоения космического пространства и конструкторские школы ракетно-космической техники; фундаментальные проблемы космонавтики и состояние развития отдельных ее направлений; место космонавтики в решении вопросов социально-экономического и стратегического развития современного общества; гуманитарные аспекты космонавтики; исследования по истории космической науки и техники.

Перечисленные направления являются основой для формирования тематики секций по отдельным проблемам современной космонавтики. В четвертый том вошли материалы секций 19–22.

Материалы представлены в форме тезисов докладов по тематике, являющейся предметом обсуждений в работе двадцати двух секций по соответствующим направлениям.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@baumanpress.ru; <https://bmstu.press>