

УДК 629.78.05

doi: 10.18698/0536-1044-2020-6-51-66

Расчетно-теоретическое обоснование технологии изготовления волноводно-распределительных систем космических аппаратов связи*

М.М. Михнёв¹, И.В. Кудрявцев², П.Н. Сильченко²

¹ АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва»

² Сибирский федеральный университет

Theoretical Justification and Analysis of Technology for Manufacturing Waveguide-and-Distribution Systems of Spacecraft Communication Devices

M.M. Mikhnev¹, I.V. Kudryavtsev², P.N. Silchenko²

¹ AO Information Satellite Systems named after Academician M.F. Reshetnev

² Siberian Federal University

Изготовление протяженной тонкостенной волноводно-распределительной системы (ВРС) пайкой из отдельных элементов связано с силовыми, деформационными и температурными воздействиями на нее, приводящими к нежелательным деформациям, как в локальных областях, так и во всей конструкции. Каждый элемент и ВРС в целом подвергаются локальному тепловому воздействию, в результате которого появляются температурные напряжения и деформации. Напряжения, возникающие вследствие нагрева, могут стать причиной необратимых локальных прогибов и искажения геометрии поперечного сечения конструкции. При сборке ВРС даже незначительные угловые и линейные смещения в местах соединения ее элементов приводят к нарушению общей геометрии конструкции, и, соответственно, к изменению расположения точек крепления относительно требуемого. Принудительное совмещение этих точек будет создавать внутренние монтажные напряжения, которые в совокупности с внешними воздействиями могут нарушить условия прочности, жесткости и расположение контрольных монтажных точек. Для достижения требуемых прочностных, жесткостных и точностных параметров ВРС необходимо выполнить расчетно-теоретическое обоснование технологических параметров, шагов, действий и режимов ее изготовления. Разработана методика расчета ВРС, позволяющая оперативно определять ее напряженно-деформированное состояние с требуемой точностью для обеспечения прочности, жесткости и достаточной геометрической точности конструкции. Предлагаемая методика рассматривает ВРС как стержневую модель в глобальной постановке и как оболочечную конструкцию при уточненном расчете локальной выделенной области. Это позволяет оценивать напряженно-деформированное состояние ВРС в целом и уточнять напряжения и деформации в выделяемых локальных областях практически с любой требуемой точностью. Приведен пример расчета динамики изменения зазора между тонкостенными элементами в процессе их пайки. Выполнен анализ напряженно-деформированного состояния монтажного паяного шва между

* Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта «Разработка методики расчета термоупругого состояния волноводно-распределительной системы космических аппаратов связи на этапе эксплуатации».

элементами. Полученные с помощью предложенной двухэтапной методики результаты обеспечивают требуемое качество на всей технологической цепочке изготовления протяженной ВРС для космического аппарата.

Ключевые слова: космический аппарат, волноводно-распределительная система, технологический режим пайки, жесткостные и точностные параметры, прочность паяного шва, монтажные точки

Manufacturing of extended thin-walled waveguide-and-distribution system (WDS) by soldering separate elements is associated with force, strain and temperature impacts leading to undesirable deformations both in local areas as well as in the whole structure. Each element and the system in general are subjected to local thermal exposure that results in temperature stresses and strains. The stresses that occur due to heating can cause irreversible deformations of the structure manifested as local deflections and distortions of the cross section geometry. When assembling waveguide-and-distribution systems, even minor angular and linear displacements in the places where the elements are joined result in disruption of the overall geometry of the structure and therefore, a displacement of the mounting points relative to the desired location. Forced alignment of these points would create internal stresses, which combined with external impacts, could violate the conditions of strength, rigidity and location of the control mounting points. To achieve the required strength, rigidity and accuracy parameters of the system, it is necessary to perform a theoretical and calculation analysis of the manufacturing process parameters, steps, actions and methods. The paper presents a method of calculating waveguide-and-distribution systems that can be used to promptly determine the stress-strain state with a required accuracy in order to ensure strength, rigidity and sufficient geometrical accuracy of the WDS structure. The WDS is treated as a rod model in the global formulation and as a shell structure when a separate local area is analyzed in detail. This approach enables the assessment of the stress-strain state in general and more precise calculations of the stresses and strains in defined local areas with nearly any required accuracy. An example showing calculations of the dynamics of variation of the gap between thin-walled elements in the process of soldering is given. An analysis of the stress-strain state of the mounting soldered seam between the elements is performed. The results obtained using the proposed two-step calculation method provide the required quality throughout the whole process of manufacturing an extended waveguide-and-distribution system for a spacecraft.

Keywords: spacecraft, waveguide-and-distribution system, technological methods of soldering, rigidity and accuracy parameters, soldering seam strength, mounting points

Волноводно-распределительная система (ВРС) является геометрически сложной тонкостенной конструкцией, к которой предъявляются высокие требования [1–3] по прочности, жесткости и точности геометрических форм и размеров при различных силовых, деформационных и температурных воздействиях на разных этапах ее жизненного цикла, включая все технологические процессы изготовления. Однако, несмотря на жесткие требования, отдельные элементы и ВРС в целом рассчитываются и изготавливаются, как правило, исходя из требований к радиотехническим параметрам, а ко всем мероприятиям, шагам и обоснованиям, относящимся к технологии, предъявляются недостаточные требования.

Снижение массогабаритных параметров всех конструкций космического аппарата является необходимостью и требует уменьшения толщины стенки волноводов с разработкой

расчетно-теоретических обоснований для всех этапов их жизненного цикла, начиная с технологии изготовления отдельных элементов и всей ВРС в целом. Для этого необходимо разработать соответствующие методы расчета ВРС и ее элементов с максимально возможной требуемой точностью на силовые, деформационные и температурные воздействия, которые возникают при ее монтаже и сборке пайкой.

Методы расчета должны позволять рассчитывать как общее напряженно-деформированное состояние (НДС) ВРС для учета всех внешних воздействий, так и прочность и жесткость любой ее локальной области на местные нагрузки. Задача осложнена тем, что ВРС представляет собой протяженную конструкцию в виде прямых и изогнутых тонкостенных стержней прямоугольного поперечного сечения, толщина стенки которых более чем в 10 раз меньше

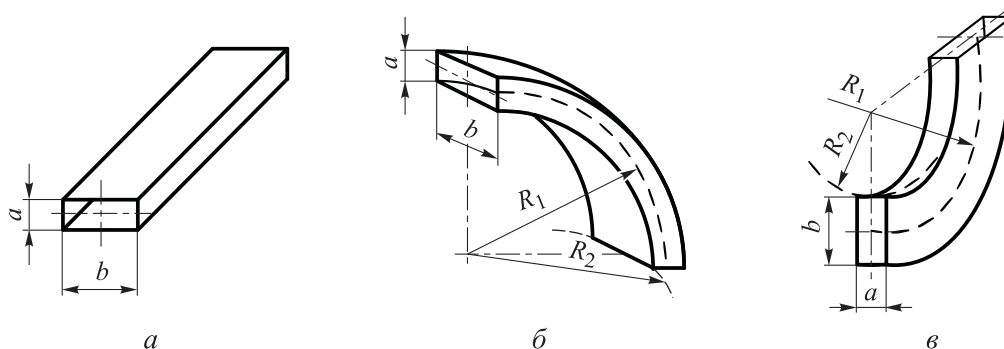


Рис. 1. Схемы прямого (а) и криволинейного (б) элементов ВРС:
 R_1, R_2 — радиусы кривизны элементов

самого малого характерного размера поперечно-го сечения a и b (рис. 1).

Моделирование геометрии таких элементов требует использования теории пластин и оболочек [4–6]. Однако образующий прямоугольное поперечное сечение контур невозможно описать одной непрерывной функцией радиуса кривизны R_1 или R_2 (см. рис. 1), как того требует классическая теория оболочек, из-за наличия особых точек, в которых описывающая функция имеет разрывы. Расчет оболочечной конструкции с такой сложной формой поперечного сечения обычно проводят путем ее разбиения на несколько отдельных элементов более простой формы. Но такой способ приводит к необходимости совместного решения нескольких систем дифференциальных уравнений, что существенно усложняет вычисления и снижает точность получаемого результата.

Обзор научной литературы [7–9] не выявил информации об общем аналитическом решении подобных систем дифференциальных уравнений. Существуют полуаналитические и численные методы [10–12], которые имеют ряд недостатков, что не отвечает современным требованиям по универсальности применения и не позволяет гарантированно и доказательно оценить точность получаемого результата [13].

Широко применяемый в настоящее время метод конечных элементов в некоторой степени удовлетворяет всем предъявляемым требованиям, но только при построении конечно-элементной (КЭ) сетки до определенного размера, что не может быть реализовано для протяженной тонкостенной конструкции, особенно в местах возможных концентраций напряжений, так как расчет крупногабаритных ВРС

таким методом требует очень больших ресурсов ЭВМ [13–15].

Выполнить указанные требования можно только при создании методики расчета ВРС на все статические и динамические силовые, деформационные и температурные внешние воздействия, возникающие при ее изготовлении и эксплуатации.

Цель работы — создание комплексной методики, на основе взаимосвязанных поэтапных методов расчета ВРС, позволяющих оценить с любой требуемой точностью ее НДС при всех указанных воздействиях без существенных вычислительных затрат.

Предлагаемые методы расчета позволяют оперативно давать обоснованные рекомендации для принятия на любых стадиях расчетно-проектно-конструкторско-технологических решений по созданию для космических аппаратов ВРС с улучшенными массогабаритными и радиотехническими параметрами. Примеры использования приведены в настоящей работе.

Комплексная поэтапная методика расчета ВРС. Напряженно-деформированное состояние ВРС трудно рассчитать по теории оболочек как аналитическими, так и численными методами, например, используя метод конечных элементов. Это неизбежно приводит к остановке вычислений после исчерпания ресурсов ЭВМ из-за большого числа элементов, либо к необходимости приобретения мощных ЭВМ, что нерационально при решении единичных задач, связанных с текущим технологическим процессом изготовления.

Для выхода из этой ситуации, воспользуемся известными результатами и допущениями:

- НДС длинных протяженных замкнутых оболочек в локальном сечении практически не

отличается от НДС эквивалентной им стержневой конструкции;

- незначительный размер муфт и фланцев в направлении длин элементов и участков не вносит значимой поправки в решение.

Следовательно, ВРС можно рассматривать как пространственную стержневую конструкцию, участки которой состоят (см. рис. 1) из прямых и изогнутых элементов (стержней).

На первом этапе осуществляется расчет известными методами всей ВРС, моделируя ее стержневой конструкцией (рис. 2, а).

В общем случае полная система дифференциальных уравнений равновесия такой пространственной стержневой конструкции имеет вид [16]

$$\begin{cases} [A]\{Q\} + \{P\} = 0; \\ [A]^T\{W\} + \{\Delta\} = 0; \\ [B]\{Q\} = \{\Delta\}, \end{cases} \quad (1)$$

где $[A]$ — матрица коэффициентов уравнений; $\{Q\}$ — вектор внутренних усилий; $\{P\}$ — вектор внешних сил; $\{W\}$ — вектор перемещения узлов стержневой конструкции; $\{\Delta\}$ — вектор деформации отдельных стержней; $[B]$ — матрица податливостей.

Первое выражение системы (1) является уравнением статического равновесия, второе выражает условия совместности деформаций, третье представляет собой запись закона Гука для отдельных стержней. Решение и расчет системы (1) выполняются по известным мето-

дам теории стержней и строительной механики [16], позволяющим оценивать НДС ВРС в целом.

На втором этапе из стержневой модели выделяется требуемый локальный участок, который транслируется в виде твердотельной модели в программный комплекс ANSYS или Nastran с приложением внешних воздействий и граничных условий, действующих на него. Локальный участок имеет значительно меньший размер, чем ВРС, следовательно, его КЭ-разбиение и расчет можно проводить с требуемой точностью.

Разработанная двухэтапная методика расчета автоматизирована в виде единого программного комплекса для ЭВМ [17–24], позволяющего оперативно определять необходимые параметры НДС стержневой модели всего волновода и выделять требуемые локальные области для уточненного расчета. Разработанная программа использована для решения различных задач, возникающих на разных этапах изготовления ВРС, рассмотренных далее.

Расчет ВРС в целом. Обоснование необходимости гибкой секции. При сборке пайкой в каждом паяном соединении участка с муфтой или фланцем возможны остаточные отклонения геометрии участка от расчетной [25]. В результате при закреплении одного конца собранной ВРС второй ее конец окажется в некоторой точке С, отстоящей от требуемой точки В на значение вектора отклонений (рис. 3).

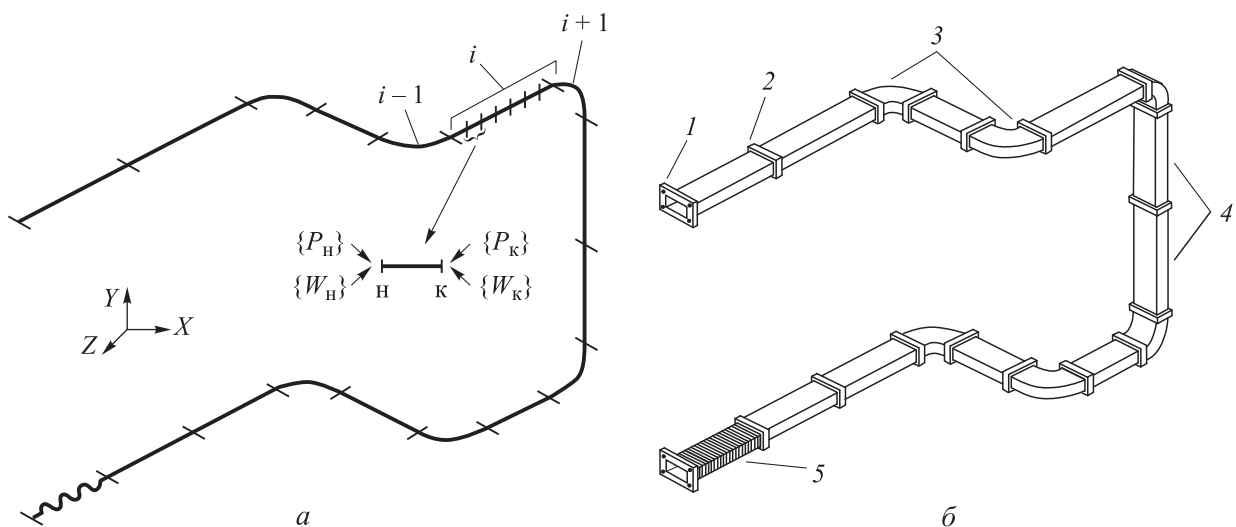


Рис. 2. Схема (а) и внешний вид (б) участка волновода:

1 — фланец; 2 — муфта; 3 и 4 — изогнутые и прямые элементы; 5 — гибкая секция; $i, i - 1, i + 1$ — номера участков; n и k — начало и конец узла стержневой конструкции; $\{P_n\}$, $\{P_k\}$ и $\{W_n\}$, $\{W_k\}$ — векторы внешних сил и перемещений в начале и конце узла стержневой конструкции соответственно

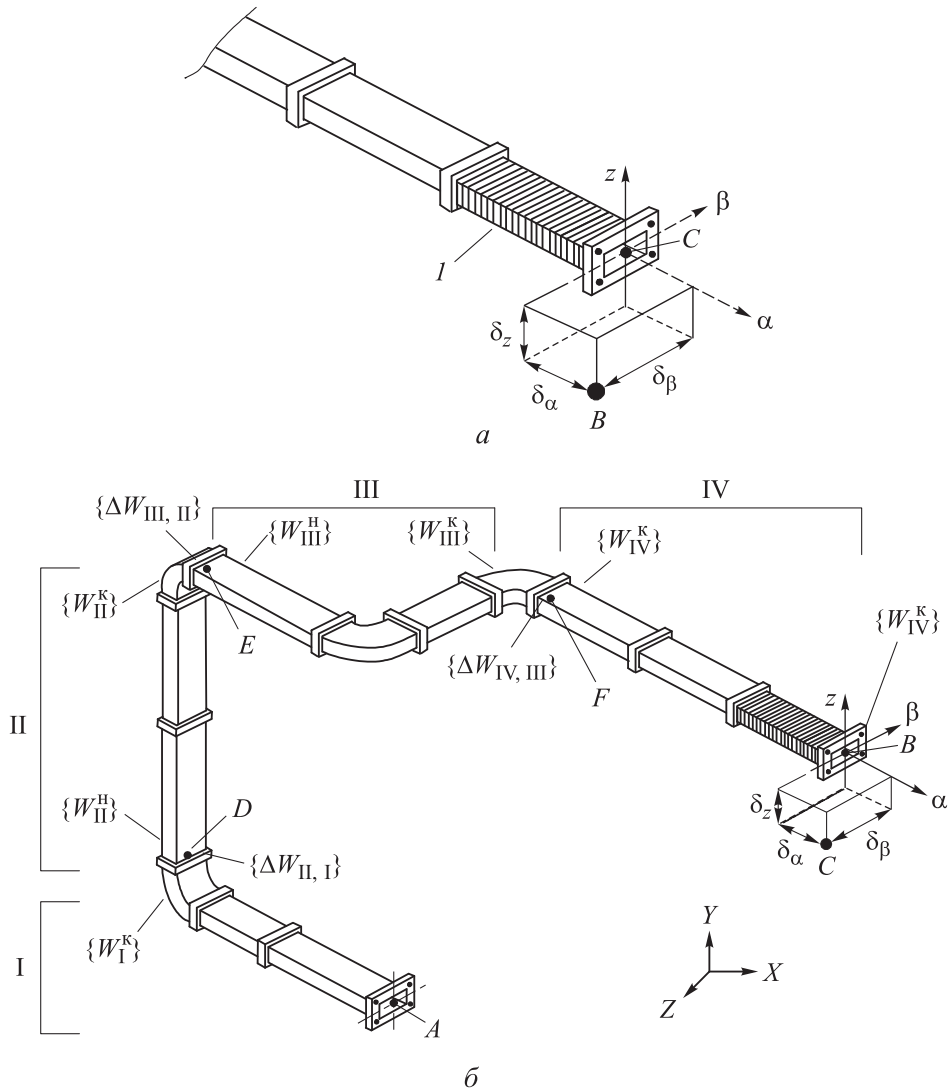


Рис. 3. Отклонения характерных точек участка волновода от требуемых положений:
 1 — гибкая секция; $\{\Delta W_{II,I}\}$, $\{\Delta W_{III,II}\}$ и $\{\Delta W_{IV,III}\}$ — вектор отклонения соответственно участка II относительно участка I, участка III относительно участка II и участка IV относительно участка III;
 $\{W_I^K\}$ — вектор перемещения в конце участка I;
 $\{W_{II}^H\}$, $\{W_{II}^K\}$ и $\{W_{III}^H\}$, $\{W_{III}^K\}$ — векторы перемещения в начале и конце участка II и III соответственно;
 δ_α , δ_β и δ_z — смещение конечной точки B по осям α , β и z соответственно;
 A, D, E и F — точки, определяющие границы участков I, II, III и IV соответственно

Для расчета и оценки отклонений получено выражение, позволяющее определять отклонение конечной точки последнего участка в зависимости от отклонения, появляющегося в каждом паяном соединении:

$$\{\Delta W_C\} = \sum_{i=1}^N [A_N][A_{N-1}] \dots [A_{i+1}][A_i]\{\Delta W_{i-1,i}\}, \quad (2)$$

где $[A_N]$, $[A_{N-1}]$, ..., $[A_{i+1}]$, $[A_i]$ — матрицы перехода на соответствующих участках; $\{\Delta W_{i-1,i}\}$ — вектор отклонения i -го участка относительно $(i - 1)$ -го участка.

Указанные отклонения по значению и направлению для одного соединения во многом

носят случайный характер, и ситуация осложняется тем, что в каждом соединении они сочетаются между собой также в случайном порядке. Таким образом, результирующее отклонение между двумя смежными участками будет иметь многофакторный вероятностный характер, который аналитически трудно сформулировать.

В настоящее время эту проблему решают заменой последнего участка ВРС гибкой секцией 1 (см. рис. 3, а) и принудительным совмещением точек. Однако гибкая секция приводит к снижению функционально-эксплуатационных характеристик ВРС, а стоимость ее изготовле-

ния во много раз выше, чем стандартного прямого участка.

В целях обоснования возможности принудительного совмещения точек без появления опасных напряжений в конструкции ВРС можно использовать метод первого этапа предложенной двухэтапной методики. Для этого необходимо смоделировать и рассчитать ее НДС согласно стержневой модели ВРС при нагружении в виде заданного вектора перемещений на одном ее конце и жестко закрепленном другом конце. Возникающие при этом напряжения в совокупности с таковыми от рабочих нагрузок не должны превышать допускаемые значения.

По результатам расчета НДС собранной ВРС можно судить о целесообразности установки гибкой секции для компенсации вектора результирующего отклонения. При весьма малых отклонениях в геометрии участка волновода после сборки принудительное соединение точек крепления, очевидно, не вызовет появления опасных напряжений и вместо гибкой секции можно установить стандартный прямой участок. Поэтому становится актуальной задача минимизации появляющихся отклонений.

Для минимизации вектора накопленных отклонений с целью возможности устранения гибкой секции, разработан блочный подход [26] при сборке ВРС. При таком подходе всю конструкцию ВРС разбивают на отдельные блоки I–IV (рис. 3, б).

Первым этапом блочной сборки является соединение пайкой указанных блоков обычным способом, что приводит к накоплению некото-

рых случайных отклонений в геометрии. После их сборки для каждого блока на пространственном контрольно-измерительном позиционере определяют действительное пространственное положение второго конца каждого блока и вычисляют вектор накопленного отклонения в геометрии от расчетной.

Вторым этапом является соединение пайкой блоков между собой. Блоки закрепляют перед пайкой на манипуляторе согласно расчетной геометрии с учетом измеренных отклонений в геометрии так, чтобы последние были скомпенсированы. Такая сборка продолжается до последнего блока ВРС. После соединения последнего блока неучтенными окажутся только случайные отклонения последнего паяного соединения, остальные отклонения будут скомпенсированы и не повлияют на вектор результирующего отклонения.

Блочный подход приводит к тому, что вектор накопленного отклонения геометрии в конечной точке всей ВРС зависит от отклонений при пайке только последнего соединения и не зависит от протяженности ВРС. Возможность установки вместо гибкой секции стандартного прямого участка при этом также выявляется после расчета НДС стержневой модели изготавливаемого участка на действие вектора отклонений (2).

Расстановка промежуточных опор. Разработанные программа и методика позволяют при расчете стержневой модели ВРС оперативно определять оптимальные места установки промежуточных опор и оперативно оценивать перераспределение усилий в получаемой кон-

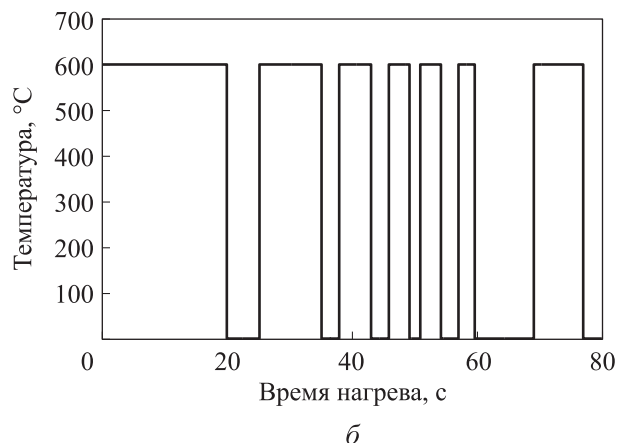
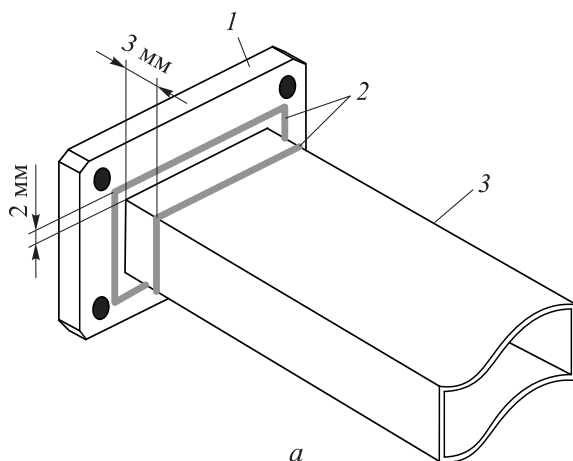


Рис. 4. Схема (а) и циклограмма (б) нагрева элементов ВРС при пайке:
1 — фланец; 2 — контуры нагрева; 3 — тонкостенный стержень

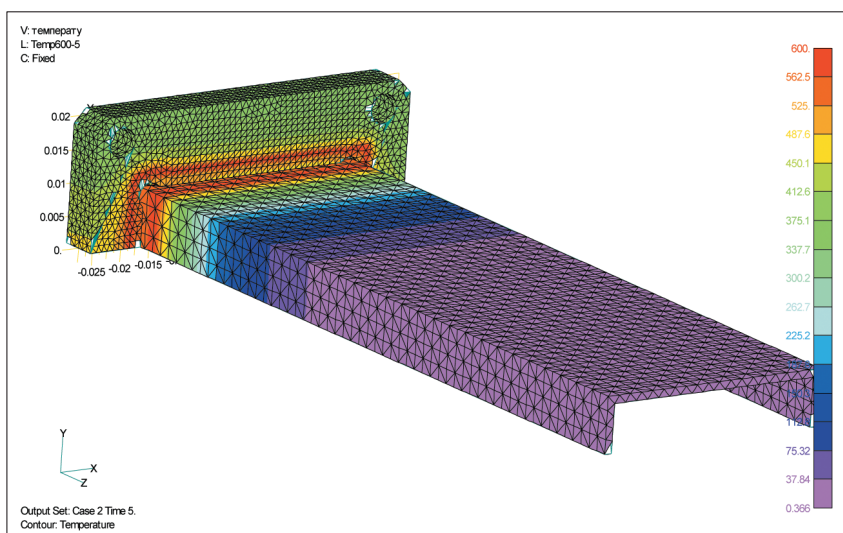
струкции ВРС для разгрузки опасных участков. Это дает возможность снизить максимальные напряжения в опасных сечениях и создает предпосылки для создания ВРС с уменьшенной толщиной стенки и, следовательно, со сниженной массой, а также позволяет разработать технологию изготовления ВРС без гибкой секции, наличие которой продиктовано опасностью возникновения критического НДС.

Выделение и расчет локальных участков ВРС. Обоснование режима пайки элементов. На этапе сборки элементов ВРС пайкой основной причиной появления опасных напряжений в

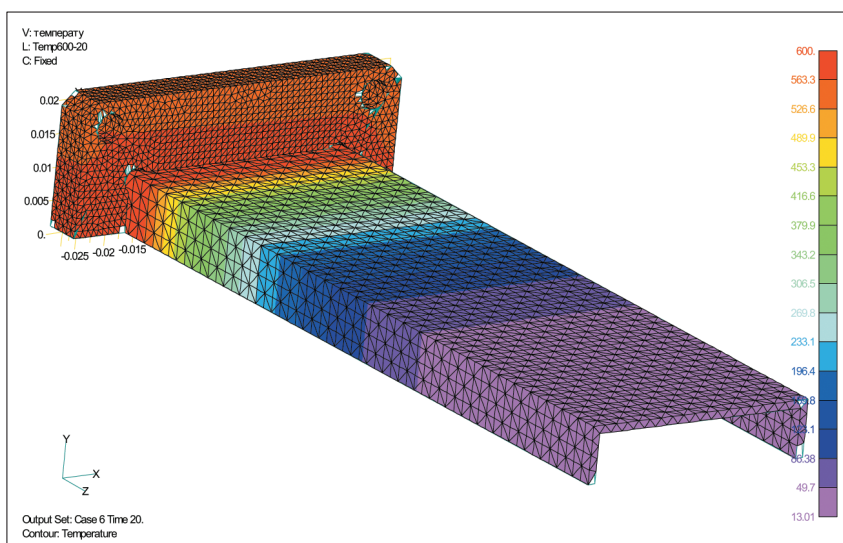
конструкции является их неравномерный нагрев. Согласно разработанной методике расчета, определены напряжения и деформации локальных участков элементов ВРС в процессе их нагрева при сборке пайкой в соответствии с циклограммой нагрева (рис. 4, а и б).

Возникающие напряжения при сборке пайкой зависят от двух основных факторов:

- время пайки мало, а нагрев осуществляется локально по двум контурам (см. рис. 4, а), что служит причиной неравномерных полей напряжений и деформаций;
- фланец и муфта являются более массивными деталями по сравнению с тонкостенными

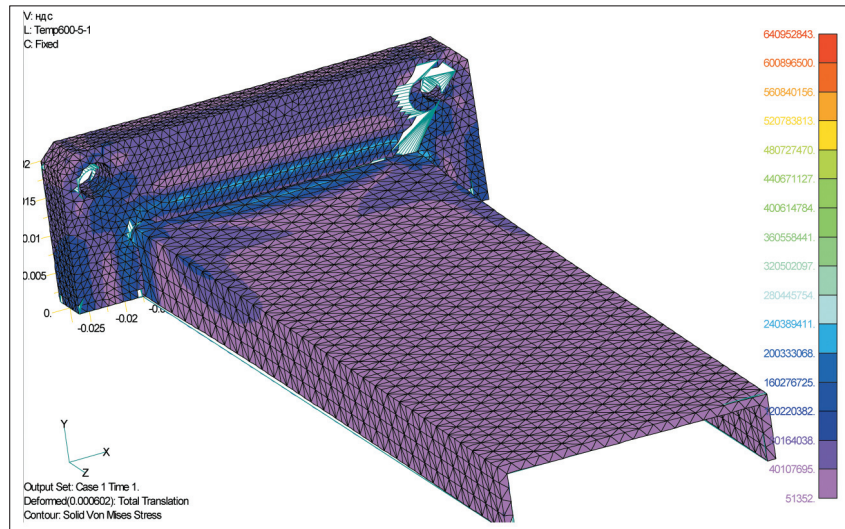


а

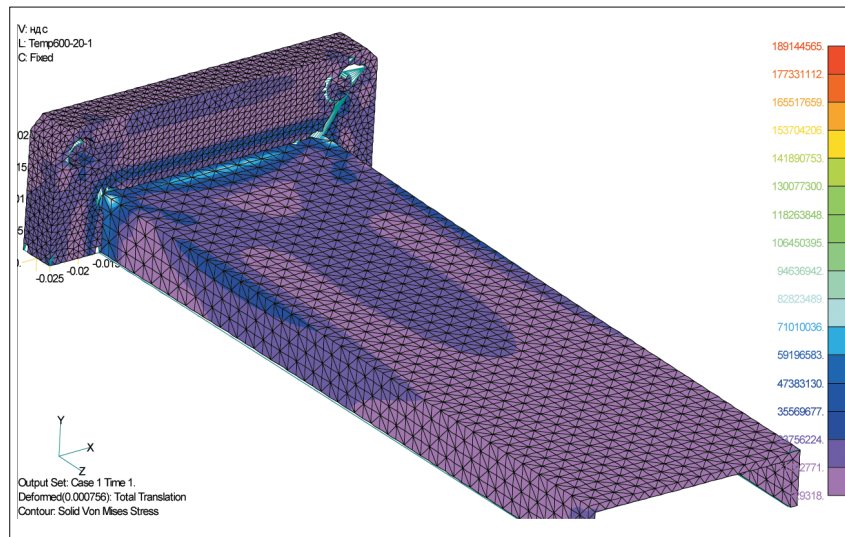


б

Рис. 5. Температурное поле, °С, элементов сборки при пайке с постоянным нагревом (а) и согласно разработанной циклограмме (б)



а



б

Рис. 6. Напряженно-деформированное состояние (напряжения, Па) элементов сборки при пайке с постоянным нагревом (а) и согласно разработанной циклограмме (б)

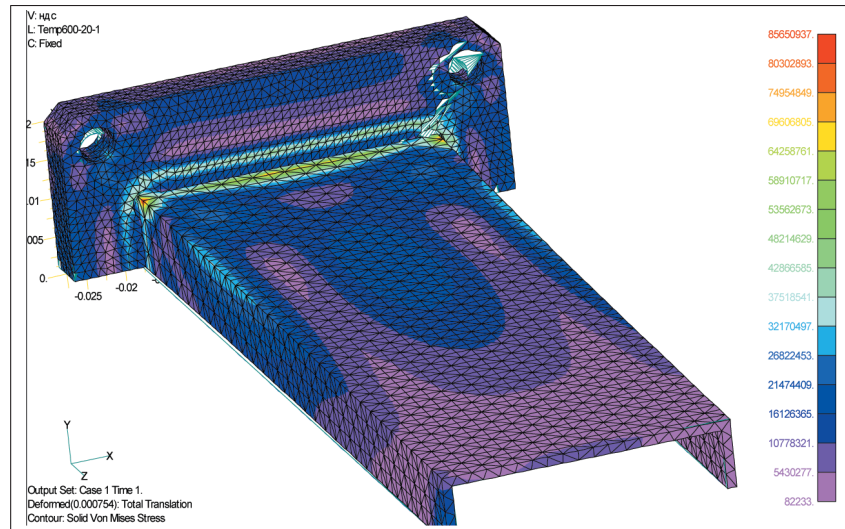
стенками волновода и получающими большие температурные деформации размеров, что может привести к заклиниванию соединения и пластическому деформированию.

Для обоснования циклограммы нагрева выполнены расчеты НДС сборки при различных вариантах временной зависимости циклограммы нагрева (постоянный нагрев, нагрев-останов с постоянным и переменным шагами и др.).

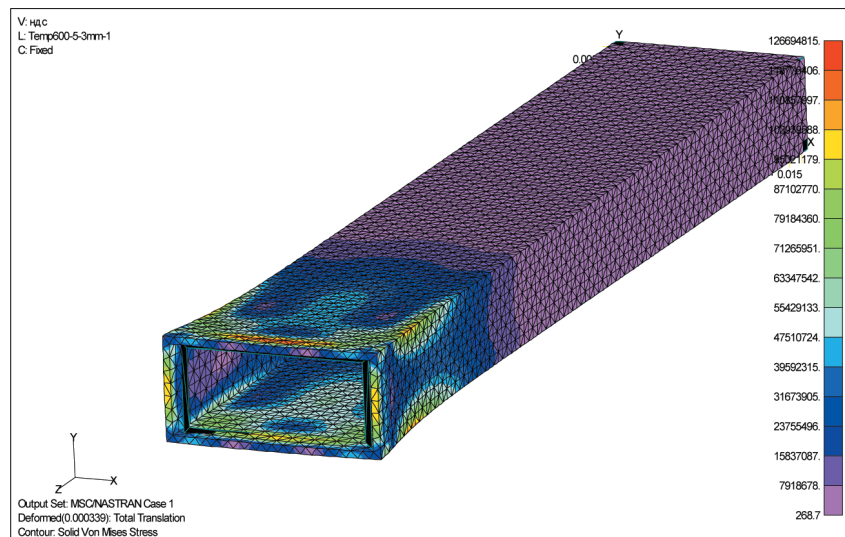
В результате обоснована циклограмма нагрева с переменным шагом во времени, что позволило равномерно прогреваться элемен-

там сборки и снизить напряжения от так называемого теплового удара. На рис. 5 показан эффект от использования разработанной циклограммы нагрева на температурное поле элементов сборки, а на рис. 6 — соответствующее снижение напряжений в элементах сборки при пайке.

Обоснование теплового зазора между элементами сборки. Как указывалось ранее, тонкостенный волновод прогревается быстрее массивного фланца или массивной муфты, что может привести к его заклиниванию в месте их



a



б

Рис. 7. Напряженно-деформированное состояние (напряжения, Па) сборки фланец — прямой волновод (а) и прямого волновода (б) при пайке

соединения с волноводом. Чтобы исключить заклинивание элементов в процессе пайки, их соединение необходимо выполнять с тепловым зазором. Для обоснования размера зазора полное время нагрева при пайке согласно циклограмме разбивалось на отдельные шаги, для каждого из которых выполнялся расчет НДС элементов (рис. 7) с регистрацией перемещений их точек в соединении.

После получения значений перемещений точек соединения элементов во времени были рассчитаны их относительные смещения, являющиеся требуемым зазором, и по результатам

построены соответствующие графики деформаций (рис. 8, а) прямого волновода и фланца. По этим данным определены размеры посадочных мест и вычислены допуски на изготовление, при которых будет отсутствовать заклинивание.

В целях надежного соединения элементов ВРС объем припоя должен быть достаточным для заполнения зазора между ними, но в то же время его не должно быть чрезмерно много, так как это ухудшит качество шва из-за больших градиентов температур, появления внутренних пор и др.

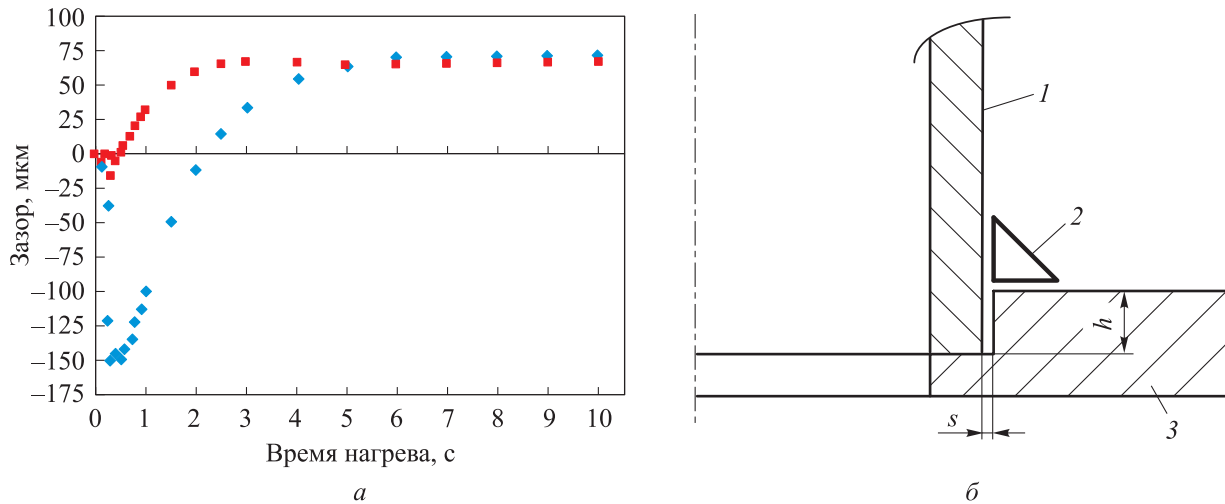


Рис. 8. Обоснование теплового зазора между тонкостенным волноводом и фланцем при пайке: *a* — зависимость теплового зазора волновода (■) и фланца (◆) от времени нагрева; *б* — схема соединения элементов ВРС с тепловым зазором s (1 — тонкостенный стержень; 2 — галтель; 3 — фланец; h — глубина теплового зазора)

Приняв галтель в форме прямоугольного треугольника с размерами катетов k (рис. 8, б) и зная периметр p , глубину h и значение зазора s , можно определить необходимый объем припоя V и диаметр проволоки-припоя для каждого типоразмера волновода.

Расчет НДС паяного шва. Расчет всей ВРС как стержневой модели позволяет определить ее общее НДС и зафиксировать области с опасными сечениями. В окрестности найденного опасного сечения (где к тому же может находиться паяный шов либо другие конструктив-

ные, геометрические или физические неоднородности) будет сложное напряженное состояние, которое невозможно определить согласно стержневой модели.

Если же рассчитать ВРС методом конечных элементов по оболочечной или твердотельной модели, то КЭ-сетка будет слишком груба для учета данных особенностей. Поэтому для расчета этого участка, имеющего достаточную длину, применим созданную комплексную двухэтапную методику, позволяющую учесть все указанные особенности. На первом этапе рассчитаем стержневую модель (рис. 9, а) всей ВРС. На вто-

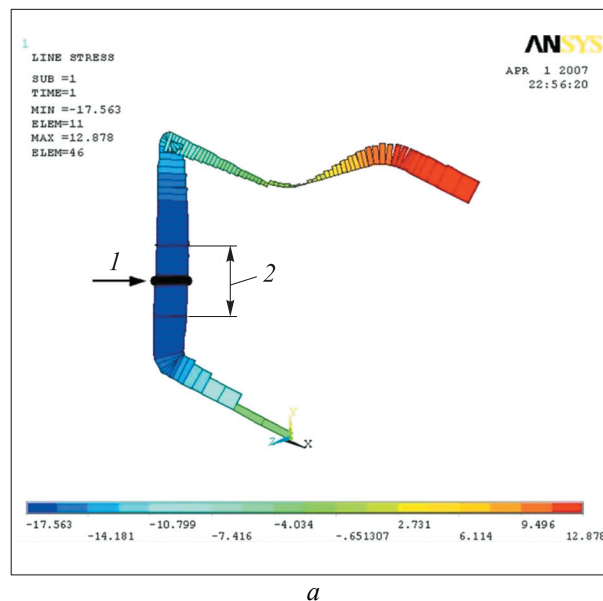
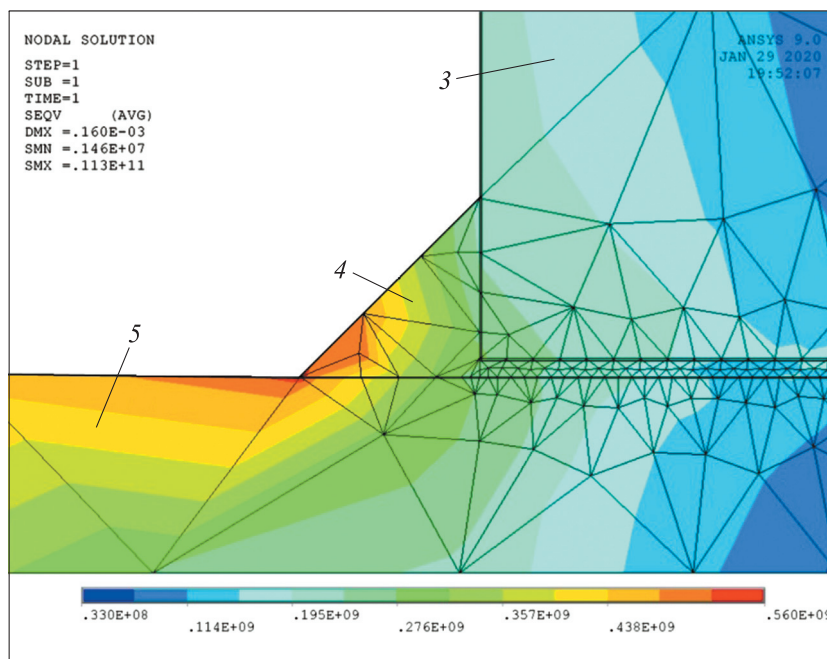


Рис. 9 (начало). Поля напряжений, полученные в результате двухэтапного расчета стержневой модели всей ВРС, МПа, (а) и паяного шва в выделенном участке, Па, (б):

1 — опасное сечение; 2 — выделенный участок; 3 — муфта; 4 — паяный шов; 5 — тонкостенный стержень



б

Рис. 9 (окончание). Поля напряжений, полученные в результате двухэтапного расчета стержневой модели всей ВРС, МПа, (а) и паяного шва в выделенном участке, Па, (б):

1 — опасное сечение; 2 — выделенный участок; 3 — муфта; 4 — паяный шов; 5 — тонкостенный стержень

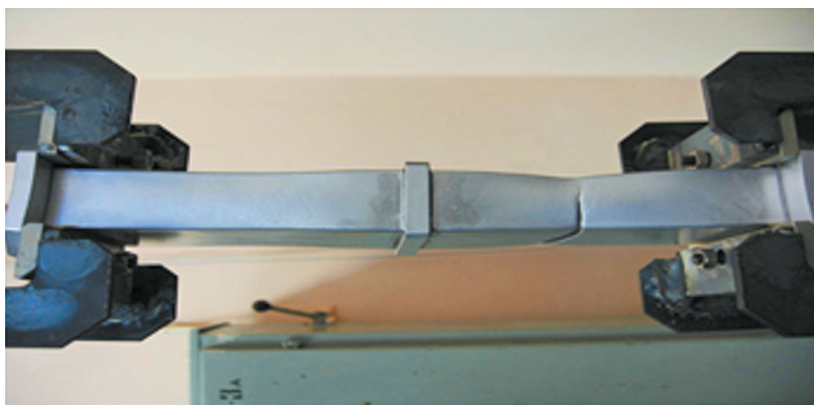


Рис. 10. Механические испытания участка волновода

ром этапе выделим исследуемый участок, к краям которого автоматически приложены найденные ранее векторы усилий и перемещений согласно разработанным программам на ЭВМ.

Выделенный локальный участок имеет малую размерность и при его разбиении можно использовать весьма мелкую КЭ-сетку. В рассматриваемом случае небольшой размер локального участка позволил разбить тонкий паяный шов (0,1 мм) на два слоя твердотельных конечных элементов (рис. 9, б). В результате расчета напряжений в паяном шве соединения муфты с прямым и изогнутым участками получена картина полей напряжений, дающая возможность определить опасные

точки и коэффициенты концентрации напряжений.

Проведенные исследования позволили обосновать конструктивные размеры элементов, условия формирования паяного шва и обеспечить равнопрочность конструкции ВРС в целом.

По результатам расчетов спроектирована конструкция ВРС, участки которой были изготовлены и испытаны (рис. 10) согласно требованиям ГОСТ РВ [27].

Анализ результатов испытаний позволил установить, что разрушение сборки с соединенными пайкой элементами всегда происходит по основному материалу в зоне потери

местной устойчивости и при разрушающем усилии растяжения на 20...30 % меньшем, чем у паяного соединения двух элементов. Следовательно, в процессе пайки нет ослабления основного материала в зоне пайки, а прочность паяного шва даже больше, чем у основного материала.

Выводы

1. Предложена комплексная методика на основе взаимосвязанных двухэтапных методов расчета протяженных тонкостенных ВРС, которая используется для обоснования технологии и технологических режимов пайки ее элементов при изготовлении.

2. Применение этой методики позволило решить следующие задачи при изготовлении ВРС: обосновать циклограмму нагрева, опреде-

лить тепловой зазор между элементами, установить требуемый объем припоя, определить вектор отклонений собранной конструкции от расчетного расположения, оперативно оценить рекомендации по местам необходимой расстановки опор и др.

3. Разработанная методика использована при проектировании и изготовлении ВРС космических аппаратов, что позволило обосновать снижение толщины стенки волноводов до 0,6...0,8 мм с выполнением требований по прочности и жесткости при снижении ее массы на 20...25 %.

4. Результаты исследований внедрены в АО «ИСС имени М.Ф. Решетнёва» при проектировании и изготовлении крупногабаритных ВРС космических аппаратов серий «ГЛОНАСС», «Экспресс», «Луч» и др.

Литература

- [1] Гаврюшин С.С., Барышникова О.О., Борискин О.Ф. *Численный анализ элементов конструкций машин и приборов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 479 с.
- [2] Бушминский И.П. *Изготовление элементов конструкций СВЧ*. Москва, Высшая школа, 1974. 304 с.
- [3] Sil'chenko P.N., Mikhnev M.M., Ankudinov A.V., Kudryavtsev I.V. Ensuring the strength and accuracy of large-size waveguide distribution systems of communication satellites. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2012, vol. 41, no. 1, pp. 91–95, doi: 10.3103/S1052618811060173
- [4] Новожилов В.В., Черных К.Ф., Михайловский Е.И. *Линейная теория тонких оболочек*. Санкт-Петербург, Изд-во Санкт-Петербургского ун-та, 2010. 380 с.
- [5] Мясников В.И., Григорьев И.В. *Расчет составных оболочечных конструкций на ЭВМ*. Москва, Машиностроение, 1981. 216 с.
- [6] Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С. *Пластинки и оболочки*. Москва, URSS, 2009. 635 с.
- [7] Полянин А.Д., Зайцев В.Ф., Журов А.И. *Методы решения нелинейных уравнений математической физики и механики*. Москва, Физматлит, 2005. 256 с.
- [8] Polyanin A.D., Nazaikinskii V.E. *Handbook of Linear Partial Differential Equations for Engineers and Scientists*. CRC Press, Boca Raton–London, 2016. 1632 p.
- [9] Solin P. *Partial Differential Equations and the Finite Element Method*. New Jersey, Wiley-Interscience, 2005. 504 p.
- [10] Галанин М.П. *Методы численного анализа математических моделей*. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 591 с.
- [11] Бакушев С.В. *Численные методы механики деформируемого твердого тела*. Пенза, ПГУАС, 2015. 268 с.
- [12] Сливкер В.И. *Строительная механика*. Москва, Ассоциация строительных вузов, 2005. 736 с.
- [13] Кудрявцев И.В., Сильченко П.Н., Михнёв М.М., Гоцелюк О.Б. Сравнительная оценка решений системы дифференциальных уравнений в задаче изгиба прямых участков волноводов космических аппаратов связи. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2017, № 1, с. 4–23, doi: 10.18698/0236-3941-2017-1-4-23
- [14] Hartmann F., Katz C. *Structural Analysis with Finite Elements*. Berlin, Springer, 2004. 484 p.
- [15] Ern A., Guermond J.L. *Theory and Practice of Finite Elements (Applied Mathematical Sciences)*. Berlin, Springer, 2004. 526 p.

- [16] Дарков А.В., Шапошников Н.Н. *Строительная механика*. Санкт-Петербург, Лань, 2005. 656 с.
- [17] Тестоедов Н.А., Сильченко П.Н., Кудрявцев И.В., Михнёв М.М., Халиманович В.И., Наговицин Н.В., Гоцелюк О.Б., Барыкин Е.С. *Статический анализ прочностных параметров складчатых тонкостенных оболочечных конструкций волноводов с замкнутым поперечным сечением*. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012661200, 2012.
- [18] Тестоедов Н.А., Сильченко П.Н., Кудрявцев И.В., Михнёв М.М., Халиманович В.И., Наговицин В.Н., Синьковский Ф.К. *Квазистатический анализ складчатых тонкостенных оболочечных конструкций волноводов*. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012661201, 2012.
- [19] Тестоедов Н.А., Сильченко П.Н., Кудрявцев И.В., Михнёв М.М., Халиманович В.И., Наговицин В.Н. *Модальный анализ складчатых тонкостенных оболочечных конструкций волноводов с замкнутым поперечным сечением*. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012661204, 2012.
- [20] Тестоедов Н.А., Сильченко П.Н., Кудрявцев И.В., Михнёв М.М., Халиманович В.И., Наговицин В.Н., Гоцелюк О.Б. *Анализ вынужденных колебаний складчатых тонкостенных оболочечных конструкций волноводов с замкнутым поперечным сечением*. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012661199, 2012.
- [21] Тестоедов Н.А., Сильченко П.Н., Кудрявцев И.В., Михнёв М.М., Халиманович В.И., Синьковский Ф.К. *Термоупругий анализ прямых элементов складчатых тонкостенных оболочечных конструкций волноводов с замкнутым поперечным сечением*. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012661202, 2012.
- [22] Тестоедов Н.А., Сильченко П.Н., Кудрявцев И.В., Михнёв М.М., Халиманович В.И., Наговицин В.Н., Синьковский Ф.К. *Термоупругий анализ криволинейных элементов складчатых тонкостенных оболочечных конструкций волноводов с замкнутым поперечным сечением*. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012661203, 2012.
- [23] Сильченко П.Н., Кудрявцев И.В., Михнёв М.М., Наговицин В.Н., Гоцелюк О.Б. *Модуль экспорта локального участка стержневой модели складчатых тонкостенных оболочечных конструкций волноводов с замкнутым поперечным сечением в твердотельную модель Nastran*. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012661197, 2012.
- [24] Сильченко П.Н., Кудрявцев И.В., Михнёв М.М., Наговицин В.Н., Гоцелюк О.Б. *Модуль экспорта локальной области складчатых тонкостенных оболочечных конструкций волноводов с замкнутым поперечным сечением из стержневой модели в твердотельную модель Ansys*. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012661198, 2012.
- [25] Воробьев Е.А. *Расчет производственных допусков устройств СВЧ*. Ленинград, Судостроение, 1980. 148 с.
- [26] Сильченко П.Н., Кудрявцев И.В., Иванов В.И., Михнёв М.М., Гусев В.Ю. Обеспечение технологии блочной сборки пайкой крупногабаритных волноводно-распределительных систем космических аппаратов. *Решетнёвские чтения, посвященные памяти ген. конструктора ракетн.-космич. систем акад. М.Ф. Решетнёва. Матер. XIV Междунар. науч. конф.*, Красноярск, 10–12 ноября 2010, ч. 1, Красноярск, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва, с. 71–73.
- [27] ГОСТ РВ 20.57.305–98. *Комплексная система контроля качества. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Методы испытаний на воздействие механических факторов*. Москва, Изд-во стандартов, 2001. 54 с.

References

- [1] Gavryushin S.S., Baryshnikova O.O., Boriskin O.F. *Chislennyy analiz elementov konstruktsiy mashin i priborov* [Numerical analysis of structural elements of machines and devices]. Moscow, Bauman Press, 2014. 479 p.

- [2] Bushminskiy I.P. *Izgotovleniye elementov konstruksiy SVCH* [Production of microwave structural elements]. Moscow, Vysshaya shkola publ., 1974. 304 p.
- [3] Sil'chenko P.N., Mikhnev M.M., Ankudinov A.V., Kudryavtsev I.V. Ensuring the strength and accuracy of large-size waveguide distribution systems of communication satellites. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2012, vol. 41, no. 1, pp. 91–95, doi: 10.3103/S1052618811060173
- [4] Novozhilov V.V., Chernykh K.F., Mikhaylovskiy E.I. *Lineynaya teoriya tonkikh obolochek* [Linear theory of thin shells]. Sankt-Petersburg, SPSTU publ., 2010. 380 p.
- [5] Myachenkov V.I., Grigor'yev I.V. *Raschet sostavnykh obolocheknykh konstruksiy na EVM* [Calculation of composite shell structures on a computer]. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 1981. 216 p.
- [6] Timoshenko S.P., Voynovskiy-Kriger S. *Plastinki i obolochki* [Plates and shells]. Moscow, URSS publ., 2009. 635 p.
- [7] Polyanin A.D., Zaytsev V.F., Zhurov A.I. *Metody resheniya nelineynykh uravneniy matematicheskoy fiziki i mekhaniki* [Methods for solving nonlinear equations of mathematical physics and mechanics]. Moscow, Fizmatlit publ., 2005. 256 p.
- [8] Polyanin A.D., Nazaikinskii V.E. *Handbook of Linear Partial Differential Equations for Engineers and Scientists*. CRC Press, Boca Raton–London, 2016. 1632 p.
- [9] Solin P. *Partial Differential Equations and the Finite Element Method*. New Jersey, Wiley-Interscience, 2005. 504 p.
- [10] Galanin M.P. *Metody chislennogo analiza matematicheskikh modeley* [Methods of numerical analysis of mathematical models]. Moscow, Bauman Press, 2012. 591 p.
- [11] Bakushev S.V. *Chislennyye metody mekhaniki deformiruyemogo tverdogo tela* [Numerical methods of mechanics of a deformable solid]. Penza, PSUAS publ., 2015. 268 p.
- [12] Slivker V.I. *Stroitel'naya mekhanika* [Structural mechanics]. Moscow, Assotsiatsiya stroitel'nykh vuzov publ., 2005. 736 p.
- [13] Kudryavtsev I.V., Sil'chenko P.N., Mikhnev M.M., Gotselyuk O.B. Comparative Evaluation of Differential Equation Solutions in the Problem of Waveguide Straight Sections Bend in Communication Spacecraft. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2017, no. 1, pp. 4–23 (in Russ.), doi: 10.18698/0236-3941-2017-1-4-23
- [14] Hartmann F., Katz C. *Structural Analysis with Finite Elements*. Berlin, Springer, 2004. 484 p.
- [15] Ern A., Guermond J.L. *Theory and Practice of Finite Elements (Applied Mathematical Sciences)*. Berlin, Springer, 2004. 526 p.
- [16] Darkov A.V., Shaposhnikov N.N. *Stroitel'naya mekhanika* [Structural mechanics]. Sankt-Petersburg, Lan' publ., 2005. 656 p.
- [17] Testoyedov N.A., Sil'chenko P.N., Kudryavtsev I.V., Mikhnev M.M., Khalimanovich V.I., Nagovitsin N.V., Gotselyuk O.B., Barykin E.S. *Sticheskiy analiz prochnostnykh parametrov skladchatykh tonkostennykh obolocheknykh konstruksiy volnovodov s zamknutym poperechnym secheniyem* [Static analysis of the strength parameters of folded thin-walled cladding designs of waveguides with a closed cross section]. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM no. 2012661200, 2012.
- [18] Testoyedov N.A., Sil'chenko P.N., Kudryavtsev I.V., Mikhnev M.M., Khalimanovich V.I., Nagovitsin V.N., Sin'kovskiy F.K. *Kvazistaticheskii analiz skladchatykh tonkostennykh obolocheknykh konstruksiy volnovodov* [Quasistatic analysis of folded thin-walled cladding designs of waveguides]. Certificate of state registration of a computer program no. 2012661201, 2012.
- [19] Testoyedov N.A., Sil'chenko P.N., Kudryavtsev I.V., Mikhnev M.M., Khalimanovich V.I., Nagovitsin V.N. *Modal'nyy analiz skladchatykh tonkostennykh obolocheknykh konstruksiy volnovodov s zamknutym poperechnym secheniyem* [Modal analysis of folded thin-walled cladding designs of waveguides with a closed cross section]. Certificate of state registration of a computer program no. 2012661204, 2012.
- [20] Testoyedov N.A., Sil'chenko P.N., Kudryavtsev I.V., Mikhnev M.M., Khalimanovich V.I., Nagovitsin V.N., Gotselyuk O.B. *Analiz vyzhdenykh kolebaniy skladchatykh tonkostennykh obolocheknykh konstruksiy volnovodov s zamknutym poperechnym secheniyem*

- [Analysis of forced vibrations of folded thin-walled cladding designs of waveguides with a closed cross section]. Certificate of state registration of a computer program no. 2012661199, 2012.
- [21] Testoyedov N.A., Sil'chenko P.N., Kudryavtsev I.V., Mikhnev M.M., Khalimanovich V.I., Sin'kovskiy F.K. *Termouprugiy analiz pryamykh elementov skladchatykh tonkostennykh obolocheknykh konstruksiy volnovodov s zamknutym poperechnym secheniyem* [Thermoelastic analysis of the direct elements of folded thin-walled cladding designs of waveguides with a closed cross section]. Certificate of state registration of a computer program no. 2012661202, 2012.
- [22] Testoyedov N.A., Sil'chenko P.N., Kudryavtsev I.V., Mikhnev M.M., Khalimanovich V.I., Nagovitsin V.N., Sin'kovskiy F.K. *Termouprugiy analiz krivolineynykh elementov skladchatykh tonkostennykh obolocheknykh konstruksiy volnovodov s zamknutym poperechnym secheniyem* [Thermoelastic analysis of curved elements of folded thin-walled cladding structures of waveguides with a closed cross section]. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM no. 2012661203, 2012.
- [23] Sil'chenko P.N., Kudryavtsev I.V., Mikhnev M.M., Nagovitsin V.N., Gotselyuk O.B. *Modul' eksporta lokal'nogo uchastka sterzhnevoy modeli skladchatykh tonkostennykh obolocheknykh konstruksiy volnovodov s zamknutym poperechnym secheniyem v tverdotel'nyuyu model' Nastran* [The module for exporting the local section of the core model of folded thin-walled cladding structures of closed-section waveguides into the Nastran solid-state model]. Certificate of state registration of a computer program no. 2012661197, 2012.
- [24] Sil'chenko P.N., Kudryavtsev I.V., Mikhnev M.M., Nagovitsin V.N., Gotselyuk O.B. *Modul' eksporta lokal'noy oblasti skladchatykh tonkostennykh obolocheknykh konstruksiy volnovodov s zamknutym poperechnym secheniyem iz sterzhnevoy modeli v tverdotel'nyuyu model' Ansys* [The module for exporting the local region of folded thin-walled cladding designs of waveguides with a closed cross section from the rod model to the Ansys solid-state model]. Certificate of state registration of a computer program no. 2012661198, 2012.
- [25] Vorob'yev E.A. *Raschet proizvodstvennykh dopuskov ustroystv SVCh* [Calculation of manufacturing tolerances for microwave devices]. Leningrad, Sudostroyeniye publ., 1980. 148 p.
- [26] Sil'chenko P.N., Kudryavtsev I.V., Ivanov V.I., Mikhnev M.M., Gusev V.Yu. Maintenance of the technology of block assemblage with soldering of large-sized waveguide-distribution systems of space vehicles. *Reshetnevskiy chteniye, posvyashchennyye pamyati gen. konstruktora raket.-kosmich. sistem akad. M.F. Reshetneva. Mater. XIV mezhdunar. nauch. konf.* [Reshetnev readings dedicated to the memory of the general designer of space rocket systems academician M.F. Reshetneva. Materials of the XIV International Scientific Conference]. Krasnoyarsk, SIBSAU publ., 2010, pt. 1, pp. 71–73.
- [27] GOST RV 20.57.305–98. *Kompleksnaya sistema kontrolya kachestva. Apparatura, pribory, ustroystva i oborudovaniye voyennogo naznacheniya. Metody ispytaniy na vozdeystviye mekhanicheskikh faktorov* [State Standard RV 20.57.305–98. Integrated quality control system. Apparatus, instruments, devices and equipment for military use. Mechanical Test Methods]. Moscow, Standartinform publ., 2001. 54 p.

Статья поступила в редакцию 14.12.2019

Информация об авторах

МИХНЁВ Михаил Михайлович — кандидат технических наук, главный технолог. АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва» (662972, Красноярский край, Железногорск, Российская Федерация, ул. Ленина, д. 52, e-mail: mix@iss-reshetnev.ru).

КУДРЯВЦЕВ Илья Владимирович — кандидат технических наук, доцент кафедры «Прикладная механика». Сибирский федеральный университет (660041, Красноярск, Российская Федерация, Свободный пр-т, д. 79, e-mail: ikudryavcev@sfu-kras.ru).

СИЛЬЧЕНКО Петр Никифорович — доктор технических наук, профессор кафедры конструкторско-технологического обеспечения машиностроительных производств. Сибирский федеральный университет (660041, Красноярск, Российская Федерация, Свободный пр-т, д. 79, e-mail: psilchenko@sfu-kras.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Михнёв М.М., Кудрявцев И.В., Сильченко П.Н. Расчетно-теоретическое обоснование технологии изготовления волноводно-распределительных систем космических аппаратов связи. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2020, № 6, с. 51–66, doi: 10.18698/0536-1044-2020-6-51-66

Please cite this article in English as:

Mikhnev M.M., Kudryavtsev I.V., Silchenko P.N. Theoretical Justification and Analysis of Technology for Manufacturing Waveguide-and-Distribution Systems of Spacecraft Communication Devices. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2020, no. 6, pp. 51–66, doi: 10.18698/0536-1044-2020-6-51-66

Information about the authors

MIKHNEV Mikhail Mikhailovich — Candidate of Science (Eng.), Chief Technologist. AO Information Satellite Systems named after Academician M.F. Reshetnev (662972, Krasnoyarsk Region, Zheleznogorsk Russian Federation, Lenin St., Bldg. 52, e-mail: mix@iss-reshetnev.ru).

KUDRYAVTSEV Ilya Vladimirovich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Applied Mechanics. Siberian Federal University (660041, Krasnoyarsk, Russian Federation, Svobodniy Ave., Bldg. 79, e-mail: ikudryavcev@sfu-kras.ru).

SILCHENKO Petr Nikiforovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Applied Mechanics. Siberian Federal University (660041, Krasnoyarsk, Russian Federation, Svobodniy Ave., Bldg. 79, e-mail: psilchenko@sfu-kras.ru).