

УДК 629.764.7: 621.7.043

doi: 10.18698/0536-1044-2023-11-83-91

Анализ напряженно-деформированного состояния тонкостенных корпусов соединителей при их изготовлении пластическим деформированием листового металла

Д.А. Фонарев¹, В.Д. Баскаков², М.А. Бабурин²,
О.В. Зарубина², В.А. Тарасов²

¹ АО «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева»

² МГТУ им. Н.Э. Баумана

Stress-strain state analysis of the thin-walled connector housings at their manufacture by the sheet metal plastic deformation

D.A. Fonarev¹, V.D. Baskakov², M.A. Baburin²,
O.V. Zarubina², V.A. Tarasov²

¹ Khrunichev State Research and Production Space Center

² Bauman Moscow State Technical University

Проанализированы достоинства и недостатки корпусов электрических соединителей бортовых кабельных сетей ракет-носителей и космических аппаратов. Предложены новые конструкция и технология изготовления корпуса, обладающего достоинствами известных технических решений и лишенного свойственных им недостатков. В основу конструкции положен бесшовный тонкостенный универсальный кожух, соединенный с патрубком токопроводящим клеем или магнитно-импульсной сваркой. Меняя на кожухе угловое положение отбортованного отверстия, можно выполнять корпуса для соединения кабелей под различными углами, добиваясь компактности прокладки кабельных сетей. Обоснован технологический процесс изготовления бесшовного кожуха, основанный на применении операций пластического деформирования тонколистового металла. Методом численного моделирования в программном комплексе Deform проанализировано напряженно-деформированное состояние осесимметричного кожуха при вытяжке в инструментальном штампе. Показано, что кожух целесообразно изготавливать ротационной вытяжкой из предварительно вытянутой в штампе заготовки промежуточной конфигурации. Обоснованы геометрические параметры промежуточной заготовки. Численными расчетами установлено, что промежуточную заготовку под ротационную вытяжку кожуха можно вытянуть в инструментальном штампе за одну операцию. Предложенные конструкция и технология изготовления кожуха обеспечивают высокую надежность кабельных соединений благодаря отсутствию продольного шва в корпусе соединителя. Анализ результатов исследований показал, что геометрические параметры и массовые характеристики бесшовного кожуха полностью соответствуют требованиям, предъявляемым к изделиям такого типа.

Ключевые слова: численное моделирование, напряженно-деформированное состояние, разнотолщинность стенки, вытяжка в инструментальном штампе, ротационная вытяжка

The paper analyzes advantages and disadvantages of the existing options in designing connector housings for the on-board cable systems of launch vehicles and spacecraft. It proposes a new housing design and manufacturing technology combining advantages of the known technical solutions and eliminating their disadvantages. The design is based on a seamless thin-walled universal casing connected to the pipe with the conductive glue or by the magnetic pulse stamping. By changing the flanged hole's angular position on the casing, it becomes possible to manufacture housings for connecting cables at different angles achieving the cable system compact laying. Technology for manufacturing a seamless casing was substantiated based on introduction of the thin-sheet metal plastic deformation. Using the numerical simulation method in the Deform software package made it possible to analyze the stress-strain state of an axisymmetric casing during drawing in a tool die. It is shown that it is advisable to manufacture the casing by rotary drawing from a workpiece with intermediate configuration previously drawn in a die. Geometric parameters of the intermediate workpiece were justified. Numerical calculations established that the intermediate workpiece for the casing rotary drawing could be drawn in a tool die in a single operation. The proposed casing design and manufacturing technology ensure high reliability of the cable connections due to the missing longitudinal joint in the connector body. Research results analysis shows that geometric parameters and mass characteristics of the seamless casing fully comply with the requirements for the products of this type.

Keywords: numerical simulation, stress-strain state, wall thickness variation, drawing in a tool die, rotational drawing

Уменьшение массы и габаритных размеров отдельных узлов и агрегатов ракет-носителей и космических аппаратов — одно из самых перспективных направлений модернизации ракетно-космической техники.

По мере совершенствования бортовых систем ракет-носителей и отправляемых на орбиту полезных грузов происходит усложнение их бортовых кабельных сетей, что влечет за собой увеличение количества мест сочленения отдельных элементов сети, а следовательно, и числа электрических соединителей (ЭС).

Наиболее распространенные типы ЭС имеют корпус, которые отличает удобство монтажа на кабели и обеспечение надежной связи между токопроводящей оболочкой кабеля и корпусом ЭС, что является необходимым требованием при производстве кабелей бортовых кабельных сетей [1]. Основными недостатками таких корпусов являются избыточная масса и большие габаритные размеры.

Для устранения недостатков корпусов ЭС разработан способ заделки экранированного кабеля в ЭС, включающий в себя изготовление электропроводного кожуха свертыванием заготовки из металлической фольги в виде патрубка с последующей раздачей его во внешнюю оснастку с одновременным скреплением кромок заготовки по образующей [2].

Свертывание заготовки происходит путем направленного воздействия импульса магнит-

ного поля [3, 4]. Корпус ЭС, изготовленный по такой технологии, имеет массу примерно на 97 % меньше, чем выполненный по традиционной технологии.

Однако у такого корпуса есть недостатки, одним из которых является малая прочность конструкции, что может привести к повреждению корпуса на этапе производства кабеля. Кроме того, такая технология позволяет получать только осесимметричный корпус, что в некоторых случаях не позволяет удовлетворить требованиям к бортовой кабельной сети в части необходимости расположения кабелей вплотную к элементам конструкции [1].

Также осесимметричная конструкция корпуса ЭС приводит к увеличенным габаритным размерам кабельных сетей при установке кабелей на изделие, так как существует требование по минимальным радиусам изгиба кабеля в месте его монтажа в ЭС — не менее пяти диаметров кабеля [5].

Кроме того, использование импульса магнитного поля для получения неразъемного соединения в области перехлеста кромок сворачиваемой заготовки не обеспечивает надежность сварного соединения. Возможны несплошности соединения и разрушение материала заготовки, существует риск локальных прорывов материала при образовании ребер жесткости и отбортовке отверстий, а также риск неудачной пробивки необходимых отверстий.

Для увеличения прочности корпусов, получаемых по описанной технологии, предложено на внутреннюю поверхность кожуха наносить герметизирующий состав, аналогичный тому, которым заполняют полость кожуха при окончательном монтаже корпуса на кабеле, с последующим отверждением состава [6]. Такое решение помогло увеличить прочность конструкции, но не избавило ее от других недостатков.

В связи с этим предложены новые конструкция и технология изготовления облегченного корпуса, лишённого перечисленных недостатков. В основе разработки конструкции и технологии лежат полученные в программном комплексе Deform результаты анализа напряженно-деформированного состояния основной детали корпуса — кожуха — при его вытяжке в инструментальном штампе.

Цель работы — определить наиболее рациональный вариант исполнения облегченного корпуса ЭС кабельных сетей и целесообразность использования магнитно-импульсной обработки при выполнении формообразующих операций.

Конструкция корпуса ЭС. Разрабатываемая конструкция облегченного корпуса ЭС должна исключить продольный сварной шов (как самое ненадежное место конструкции), сохранить его массу на уровне штатного изделия и обеспечить возможность выполнения угловых соединений.

Реализовать перечисленные свойства можно, например, в составной конструкции корпуса ЭС, приведенной на рис. 1. Корпус состоит из кожуха 1 и патрубка 2, наклоненного на угол α к оси кожуха, изготовленных из алюминиевой фольги с исходной толщиной s_0 .

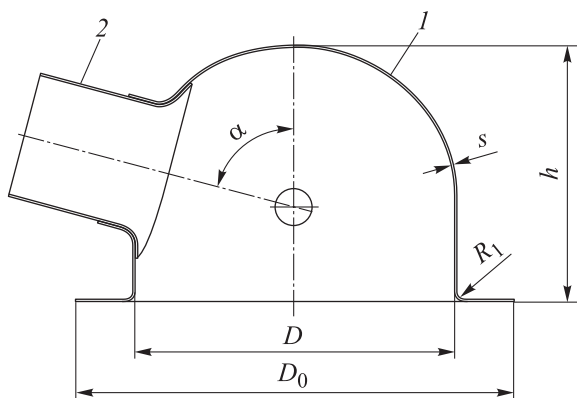


Рис. 1. Схема корпуса ЭС составной конструкции

Детали 1 и 2 соединены путем нанесения на сопрягаемые поверхности электропроводного клея, например, ЭПК-1 [7]. При изменении углового расположения отбортованного отверстия на кожух можно устанавливать патрубок под углом $15^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$, что позволяет использовать корпус практически на любых кабелях ракет-носителей.

Применение такой конструкции позволит унифицировать технологические процессы изготовления и установки корпусов на ЭС, объединив достоинства существующих вариантов их исполнения.

Анализ процесса вытяжки кожуха в инструментальном штампе. Основная деталь корпуса — кожух, представляющий собой тонкостенную оболочку высотой h и толщиной s , которая имеет плоский фланец диаметром D_0 , сопряженный радиусом R_1 с цилиндрической областью диаметра D , закрытой сферическим куполом (см. рис. 1). Толщина кожуха s должна отклоняться от толщины применяемого для его изготовления листа s_0 не более чем на 20 %.

Одной из наиболее рациональных технологий изготовления кожуха является вытяжка в инструментальном штампе. При ее реализации для предотвращения потери устойчивости тонкостенной заготовки, в частности гофрообразования фланцевой части, предусмотрен прижим [8, 9].

При моделировании процесса вытяжки кожуха в инструментальном штампе использован программный комплекс Deform. Этот комплекс позволяет решать широкий спектр задач моделирования и анализа процессов штамповки, в том числе исследовать параметры напряженно-деформированного состояния тонкостенных деталей на разных стадиях вытяжки [10, 11]. При расчетах принята модель трения по Кулону

$$t = fp + a,$$

где f — коэффициент трения скольжения; p — усилие деформации; a — удельное сопротивление скольжению, обусловленное адгезионным взаимодействием [12].

Формы меридиана кожуха при вытяжке в инструментальном штампе для различных значений относительного хода пуансона \bar{H} приведены на рис. 2, где $\bar{H} = 0$ — начало процесса вытяжки; $\bar{H} = 1,00$ — его окончание.

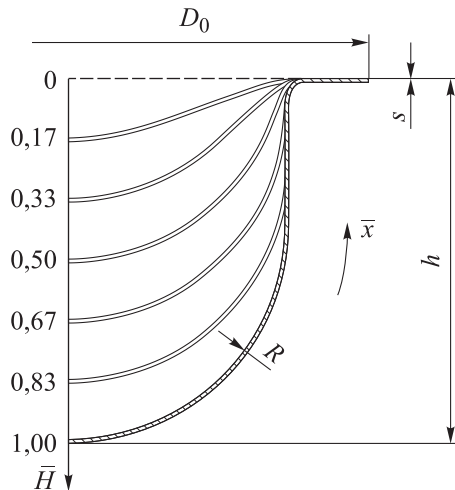


Рис. 2. Формы меридиана кожуха при вытяжке в инструментальном штампе для различных значений относительного хода пуансона \bar{H}

Относительная толщина стенки детали \bar{s} и координата \bar{x} определяются по следующим выражениям:

$$\bar{s} = s(x)/s; \quad \bar{x} = x/x_{\max},$$

где $s(x)$ и s — текущая и номинальная толщина стенки кожуха; x и x_{\max} — текущее и максимальное удаление точки от вершины купола детали в меридиональном направлении.

Полученные после обработки результатов численных расчетов графические зависимости интенсивности напряжений σ_i и относительной толщины стенки детали \bar{s} от относительной координаты \bar{x} при ходе пуансона $\bar{H} = 1,00, 0,83, 0,67, 0,50, 0,33$ и $0,17$ приведены на рис. 3, где σ_b — предел прочности.

Видно, что разрушение заготовки ($\sigma_i \geq \sigma_b = 105$ МПа [13], для расчетов взят алюминий 1050А, являющийся зарубежным аналогом алюминия А5) с высокой долей вероятности произойдет при ходе пуансона $\bar{H} = 0,67$. При этом разнотолщинность кожуха $\Delta = \bar{s}_{\max} - \bar{s}_{\min} = 0,79$, где $\bar{s}_{\max} = 1,23$ — максимальное значение относительной толщины стенки \bar{s} ; $\bar{s}_{\min} = 0,44$ — ее минимальное значение.

Анализ полученных результатов показал, что изготовление кожуха вытяжкой из плоской круглой заготовки в инструментальном штампе за одну операцию не представляется возможным. В связи с этим предложена технология изготовления корпусов, содержащая следующие основные формообразующие операции:

- предварительную вытяжку профилированной заготовки из круглой плоской заготовки (формирование центральной пологой сферической части, цилиндрического участка и плоскоугольного фланца);

- ротационную вытяжку кожуха из профилированной заготовки с окончательным формированием сферической поверхности и удлинением цилиндрического участка с одновременным незначительным утонением стенки.

Возможны и другие технологии изготовления кожуха, например, многооперационная вытяжка, вытяжка в инструментальном штампе из заготовки переменной толщины за одну операцию и штамповка пластичным металлом [14–16]. Однако такие технологии сложны в реализации при малой толщине листового металла, либо требуют значительных затрат на изготовление нескольких комплектов штамповой оснастки, вследствие чего являются неэффективными в условиях многономенклатурного производства.

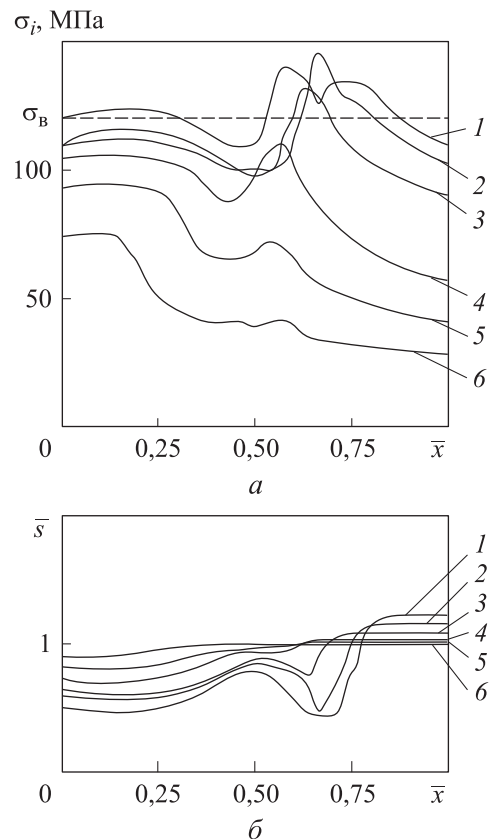


Рис. 3. Зависимости интенсивности напряжений σ_i (а) и относительной толщины стенки детали \bar{s} (б) от координаты \bar{x} при ходе пуансона $\bar{H} = 1,00$ (1), $0,83$ (2), $0,67$ (3), $0,50$ (4), $0,33$ (5) и $0,17$ (6)

Обоснование формы заготовки для ротационной вытяжки. Процесс ротационной вытяжки позволяет существенно повысить технико-экономические показатели производства и качество продукции.

Траекторией движения роликов является кривая, эквидистантно расположенная относительно оправки со смещением, равным требуемой толщине стенки детали.

Заготовка для ротационной вытяжки должна представлять собой пологую деталь постоянной толщины, состоящую из фланцевой и профилированной частей. Последняя включает в себя цилиндрическую и донную составляющие для формообразования соответственно цилиндрического и сферического участков кожуха.

В целях сохранения массовых характеристик, соответствующих корпусам, изготовленным по технологии магнитно-импульсной обработки металлов, приняты следующие исходные данные: $s = 0,15$ мм; $s_0 = 0,20$ мм. Масштабируемость процессов позволила провести расчеты для одного типоразмера спроектированного корпуса с радиусом $R = D/2 = 13,5$ мм.

Заготовка под ротационную вытяжку разработана исходя из обеспечения наименьшего коэффициента вытяжки при ее изготовлении и, как следствие, наименьшей разнотолщинности в купольной части [16]. Спроектированная заготовка под ротационную вытяжку, совмещенная с кожухом, приведена на рис. 4.

В пределах угла $\pi/5$ профиль донной части заготовки совпадает с профилем кожуха, по-

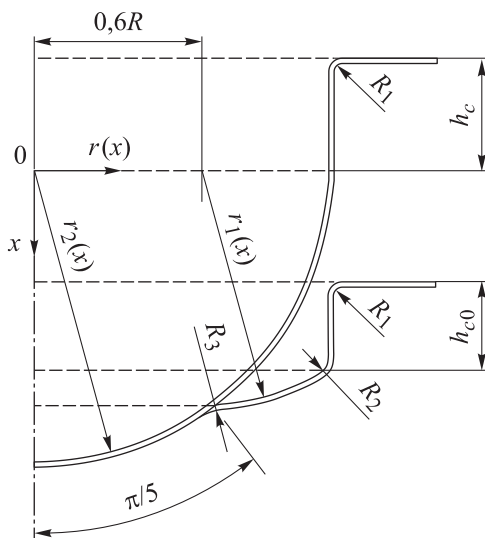


Рис. 4. Образующие заготовки для ротационной вытяжки и готового кожуха

этому в этой области ротационную вытяжку не выполняют. До сопряжения с цилиндром меридиан донной части заготовки также близок по форме к дуге окружности. В этой области заготовка при ротационной вытяжке будет сохранять толщину.

Форму образующей меридиана донной части можно описать зависимостью

$$r(x) = \begin{cases} r_1(x) = \sqrt{(0,8R)^2 - x^2} + 0,6R \\ \text{при } x \in [0, 693R; 0,8R]; \\ r_2(x) = \sqrt{r^2 - x^2} \text{ при } x \in [0,8R; R]. \end{cases}$$

Помимо донной части заготовка должна содержать в себе цилиндрический участок и плоский фланец. Так как ротационную вытяжку цилиндрического участка выполняют с утонением стенки, требуемая высота цилиндрического участка заготовки для ротационной вытяжки h_{c0} будет являться произведением конечной высоты цилиндрического участка h_c (определяемой конструкцией корпуса) и отношения толщины стенки корпуса s к толщине исходной заготовки s_0 :

$$h_{c0} = \frac{s}{s_0} h_c.$$

Таким образом, получена промежуточная заготовка, из которой ротационной вытяжкой можно изготовить корпус ЭС (см. рис. 4). Эту заготовку следует изготавливать вытяжкой в инструментальном штампе за один переход.

Анализ напряженно-деформированного состояния промежуточной заготовки при вытяжке в инструментальном штампе. Полученная заготовка обладает резкими перегибами между различными поверхностями, что может вызвать проблемы при ее вытяжке. Для организации успешного процесса вытяжки необходимо обеспечить плавные сопряжения различных участков заготовки.

В программном комплексе Deform выполнены расчеты параметров напряженно-деформированного состояния трех вариантов промежуточной заготовки, различающихся радиусами закругления у соседних участков: 1 — $R_1 = 0,6$ мм, $R_2 = 0,4$ мм, $R_3 = 0,2$ мм; 2 — $R_1 = 0,6$ мм, $R_2 = 1,2$ мм, $R_3 = 1,0$ мм; 3 — $R_1 = 0,6$ мм, $R_2 = 0,8$ мм, $R_3 = 0,6$ мм.

Полученные по результатам расчета графические зависимости интенсивности напряжений σ_i и относительной толщины стенки дета-

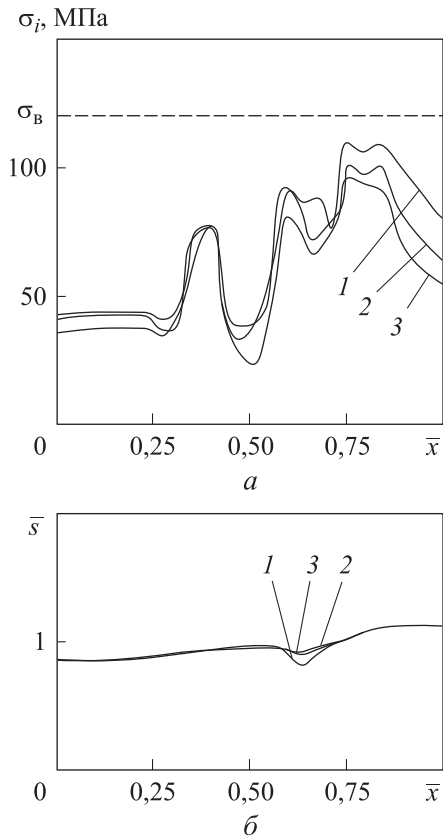


Рис. 5. Зависимости интенсивности напряжений σ_i (а) и относительной толщины стенки детали \bar{s} (б) от относительной координаты \bar{x} при различных радиусах закругления у соседних участков промежуточной заготовки:

- 1 — $R_1 = 0,6$ мм, $R_2 = 0,4$ мм, $R_3 = 0,2$ мм;
 2 — $R_1 = 0,6$ мм, $R_2 = 1,2$ мм, $R_3 = 1,0$ мм;
 3 — $R_1 = 0,6$ мм, $R_2 = 0,8$ мм, $R_3 = 0,6$ мм

ли \bar{s} от относительной координаты \bar{x} для трех промежуточных заготовок приведены на рис. 5.

Видно, что с увеличением радиусов закругления между сопрягающимися поверхностями интенсивность напряжений и разнотолщинность в области перехода донной части в цилиндрическую область снижаются. При этом общая величина разнотолщинности не становится меньше минимального значения $\Delta = 0,28$ вследствие неизбежного утонения стенки в купольной части заготовки.

Литература

- [1] ГОСТ Р 56530–2015. Совместимость космической техники электромагнитная. Общие требования к бортовой кабельной сети космической техники. Москва, Стандартинформ, 2015. 11 с.
- [2] Крутин А.Ф., Карандашев Н.А., Глинберг А.Д. Способ заделки экранированного кабеля в электросоединитель. Патент РФ 2113041. Заявл. 10.07.1996, опубл. 10.06.1998.
- [3] Белый И.В., Фертик С.М., Хименко Л.Т. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов. Харьков, Высшая школа, 1977. 168 с.

Таким образом, разработанную заготовку при всех рассмотренных сочетаниях радиусов закругления можно вытянуть в инструментальном штампе и применять для ротационной вытяжки кожуха. Следовательно, при изготовлении корпусов ЭС можно отказаться от магнитно-импульсной штамповки, выполняя их без ненадежного продольного стыка.

Тем не менее существуют области, где использование магнитно-импульсной штамповки является более рациональным решением. К ним можно отнести изготовление биметаллических переходников [17], выполнение и отбортовку отверстий в тонких оболочках [18]. Такие переходники при изготовлении методом магнитно-импульсной штамповки позволяют снизить трудоемкость путем уменьшения количества и сложности заготовительных операций, исключить из технологического цикла многооперационную вытяжку и отжиги, снизить вероятность брака и повысить прочность и герметичность конструкции.

Выводы

1. Предложена конструкция корпуса ЭС, устраняющая недостатки, присущие штатному исполнению, включая продольный стыковой шов, и обеспечивающая возможность компактного углового соединения кабельных сетей.

2. Обоснован маршрутный технологический процесс изготовления бесшовного кожуха корпуса, предполагающий вытяжку промежуточной заготовки в инструментальном штампе и последующую ротационную вытяжку. Определены основные параметры заготовки под ротационную вытяжку корпуса.

3. Установлено, что вытяжку в инструментальном штампе промежуточной заготовки можно выполнить за одну технологическую операцию с обеспечением требований по разнотолщинности кожуха.

- [4] Прокофьев А.Б., Беляева И.А., Глуценков В.А. и др. *Магнитно-импульсная обработка материалов (МИОМ)*. Самара, СНЦ, 2019. 140 с.
- [5] ОСТ 92–0320–68. Кабели. *Общие технические условия*. 39 с.
- [6] Карандашев Н.А., Глинберг А.Д., Сидоренков Е.Н. *Способ заделки экранированного кабеля в электросоединитель*. Патент РФ 2305880. Заявл. 05.10.2005, опубл. 10.09.2007.
- [7] ОСТ 92–0949–74. Клеи. *Типовые технологические процессы склеивания материалов*. 177 с.
- [8] Чумадин А.С. *Теория и расчеты процессов листовой штамповки*. Москва, Экспосервис ВИП, 2014. 216 с.
- [9] Романовский В.П. *Справочник по холодной штамповке*. Ленинград, Машиностроение, 1979. 520 с.
- [10] Сторожилов В.А., Фонарев Д.А. Численный анализ процесса деформирования листовых заготовок переменной толщины при вытяжке цилиндрических деталей. *Новые подходы и технологии проектирования, производства, испытаний и промышленного дизайна изделий ракетно-космической техники. Сб. тр. II Межд. молодежной конф.* Москва, Диона, 2018, с. 183–187.
- [11] Фонарев Д.А. Численный анализ разнотолщинности пологих листовых заготовок деталей летательных аппаратов при различных схемах ведения процесса штамповки. *Политехнический молодежный журнал*, 2019, № 9, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2019-9-518>
- [12] Грудев А.П., Зильберг Ю.В., Тилик В.Т. *Трение и смазки при обработке металлов давлением*. Москва, Металлургия, 1982. 312 с.
- [13] Aluminium Alloy — Commercial alloy — 1050A H14 sheet. *aalco.co.uk: веб-сайт*. URL: https://www.aalco.co.uk/datasheets/Aluminium-Alloy-1050A-H14-Sheet_57.ashx (дата обращения: 15.02.2023).
- [14] Бабурин М.А., Баскаков В.Д., Герасимов Н.В. и др. Математическая модель расчета предельного коэффициента вытяжки цилиндрических деталей из листовых заготовок переменной толщины. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2018, № 4, с. 10–18, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2018-4-10-18>
- [15] Бабурин М.А., Баскаков В.Д., Зарубина О.В. и др. *Способ штамповки-вытяжки оболочечных листовых деталей пластичным металлом*. Патент РФ 2623510. Заявл. 04.04.2016, опубл. 27.06.2017.
- [16] Сторожилов В.А., Фонарев Д.А. Численный анализ процесса вытяжки цилиндрических деталей из листовых заготовок переменной толщины. *Политехнический молодежный журнал*, 2018, № 11, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2018-11-402>
- [17] Логунов Л.П., Кутырев М.В., Потапов В.Т. и др. *Способ получения неразъемного соединения осесимметричных полых деталей из разнородных материалов*. Патент РФ 2636962. Заявл. 23.11.2016., опубл. 29.11.2017.
- [18] Лебедев Г.М., Комаров А.Д., Исарович Г.З. и др. Отбортовка отверстий и наружного контура заготовок из листового металла импульсным магнитным полем. *Кузнечно-штамповочное производство*, 1970, № 4, с. 25–28.

References

- [1] GOST R 56530–2015. *Sovmestimost kosmicheskoy tekhniki elektromagnitnaya. Obshchie trebovaniya k bortovoy kabelnoy seti kosmicheskoy tekhniki* [State standard GOST R 56530–2015. Electromagnetic compatibility of space technology. General requirements for onboard cable network of space vehicles]. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 11 p. (In Russ.).
- [2] Krutin A.F., Karandashev N.A., Glinberg A.D. *Sposob zadelki ekranirovannogo kabelya v elektrosoedinitel* [Method for terminating shielded cable in electric connector]. Patent RU 2113041. Appl. 10.07.1996, publ. 10.06.1998. (In Russ.).
- [3] Bely I.V., Fertik S.M., Khimenko L.T. *Spravochnik po magnitno-impulsnoy obrabotke metallov* [Handbook on magnetic pulse machining of metals]. Kharkov, Vysshaya shkola Publ., 1977. 168 p. (In Russ.).

- [4] Prokofyev A.B., Belyaeva I.A., Glushchenkov V.A. et al. *Magnitno-impulsnaya obrabotka materialov (MIOM)* [Magnetic impulse processing of materials (MIOM)]. Samara, SNTs Publ., 2019. 140 p. (In Russ.).
- [5] OST 92–0320–68. *Kabeli. Obshchie tekhnicheskie usloviya* [Union standard OST 92 0320 68. Cables. General technical conditions]. 39 p. (In Russ.).
- [6] Karandashev N.A., Glinberg A.D., Sidorenkov E.N. *Sposob zadelki ekranirovannogo kabelya v elektrosoedinitel* [Method for sealing shielded cable in electrical connector]. Patent RU 2305880. Appl. 05.10.2005, publ. 10.09.2007. (In Russ.).
- [7] OST 92–0949–74. *Klei. Tipovye tekhnologicheskie protsessy skleivaniya materialov* [Union standard OST 92–0949–74. Adhesives. Typical processes of bonding materials]. 177 p. (In Russ.).
- [8] Chumadin A.S. *Teoriya i raschety protsessov listovoy shtampovki* [Theory and calculations of sheet metal forming processes]. Moscow, Eksposervis VIP Publ., 2014. 216 p. (In Russ.).
- [9] Romanovskiy V.P. *Spravochnik po kholodnoy shtampovke* [Handbook of cold forming]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1979. 520 p. (In Russ.).
- [10] Storozhilov V.A., Fonarev D.A. [Researching of the cylindrical detail drawing process from workpieces with variable thicknesses by a numerical method]. *Novye podkhody i tekhnologii proektirovaniya, proizvodstva, ispytaniy i promyshlennogo dizayna izdeliy raketno-kosmicheskoy tekhniki. Sb. tr. II Mezhd. molodezhnoy konf.* [New Approaches and Technologies for Design, Production, Tests and Industrial Design of Rocket-Space Technology Products. Proc. II Int. Youth Conf.]. Moscow, Diona Publ., 2018, pp. 183–187. (In Russ.).
- [11] Fonarev D.A. Numerical analysis of the thickness variation of shallow parent sheets of aircraft parts for various patterns of the stamping process. *Politekhnicheskiiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical Student Journal], 2019, no. 9, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2019-9-518> (in Russ.).
- [12] Grudev A.P., Zilberg Yu.V., Tiliik V.T. *Trenie i smazki pri obrabotke metallov davleniem* [Friction and lubrication in metal forming]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1982. 312 p. (In Russ.).
- [13] Aluminium Alloy — Commercial alloy — 1050A H14 sheet. *aalco.co.uk: website*. URL: https://www.aalco.co.uk/datasheets/Aluminium-Alloy-1050A-H14-Sheet_57.ashx (accessed: 15.02.2023).
- [14] Baburin M.A., Baskakov V.D., Gerasimov N.V. et al. A mathematical model for calculating the limiting drawing ratio of cylindrical parts drawn from sheet blanks of variable thickness. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2018, no. 4, pp. 10–18, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2018-4-10-18> (in Russ.).
- [15] Baburin M.A., Baskakov V.D., Zarubina O.V. et al. *Sposob shtampovki-vytyazhki obolochechnykh listovykh detaley plastichnym metallom* [Method of forming-drawing down of the shell-sheet parts by plastic metal]. Patent RU2623510. Appl. 04.04.2016, publ. 27.06.2017. (In Russ.).
- [16] Storozhilov V.A., Fonarev D.A. Numerical analysis of the process-drawing of cylindrical parts of parent sheet work materials of tapered thickness. *Politekhnicheskiiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical Student Journal], 2018, no. 11, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2018-11-402> (in Russ.).
- [17] Logunov L.P., Kutuyev M.V., Potapov V.T. et al. *Sposob polucheniya nerazemnogo soedineniya osesimmetrichnykh polykh detaley iz raznorodnykh materialov* [Method for obtaining permanent connection of axisymmetrical hollow parts from different materials]. Patent RU2636962. Appl. 23.11.2016., publ. 29.11.2017. (In Russ.).
- [18] Lebedev G.M., Komarov A.D., Isarovich G.Z. et al. Flanging of holes and the outer contour of sheet metal workpieces using a pulsed magnetic field. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo*, 1970, no. 4, pp. 25–28. (In Russ.).

Информация об авторах

ФОНАРЕВ Денис Антонович — инженер-конструктор второй категории. АО «Государственный космический научно-производственный центр имени М.В. Хруничева» (121309, Москва, Российская Федерация, ул. Новоаводская, д. 18, e-mail: d.a.fonarev@gmail.com).

БАСКАКОВ Владимир Дмитриевич — доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: baskakov_vd@bmstu.ru).

БАБУРИН Михаил Аронович — кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: baburin_ma@bmstu.ru).

ЗАРУБИНА Ольга Васильевна — кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: zarubina.o.v@bmstu.ru).

ТАРАСОВ Владимир Алексеевич — доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: tarasovva@bmstu.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Фонарев Д.А., Баскаков В.Д., Бабурин М.А., Зарубина О.В., Тарасов В.А. Анализ напряженно-деформированного состояния тонкостенных корпусов соединителей при их изготовлении пластическим деформированием листового металла. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 11, с. 83–91, doi: 10.18698/0536-1044-2023-11-83-91

Please cite this article in English as:

Fonarev D.A., Baskakov V.D., Baburin M.A., Zarubina O.V., Tarasov V.A. Stress-strain state analysis of the thin-walled connector housings at their manufacture by the sheet metal plastic deformation. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 11, pp. 83–91, doi: 10.18698/0536-1044-2023-11-83-91

Information about the authors

FONAREV Denis Antonovich — Design Engineer of 2nd Category. Khrunichev State Research and Production Space Center (121309, Moscow, Russian Federation, Novozavodskaya St., Bldg. 18, e-mail: d.a.fonarev@gmail.com).

BASKAKOV Vladimir Dmitrievich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Technology of Rocket-and-Space Engineering Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: baskakov_vd@bmstu.ru).

BABURIN Mikhail Aronovich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Technology of Rocket-and-Space Engineering Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: baburin_ma@bmstu.ru).

ZARUBINA Olga Vasilievna — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Technology of Rocket-and-Space Engineering Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: zarubina.o.v@bmstu.ru).

TARASOV Vladimir Alekseevich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Technology of Rocket-and-Space Engineering Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: tarasov_va@mail.ru).