

И. Д. Самойленко, В. В. Волошин, В. И. Онофриенко, Д. Н. Безкорсый

ПИРОБОЛТЫ: ТИПЫ, КОНСТРУКЦИИ, ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ. ПИРОБОЛТ СРЕЗНОГО ТИПА, РАЗРАБОТАННЫЙ В КБ "ЮЖНОЕ"

Пироболты, или разрывные болты, относятся к пиротехническим устройствам с монолитным корпусом, состоящим из оголовка, как правило с шестигранной поверхностью, и цилиндрической части с резьбой. Пироболты разделяются на части с помощью пиротехнического заряда, размещенного внутри корпуса. Благодаря простоте конструкции, надежности и малому времени срабатывания пироболты нашли широкое применение в аэрокосмической технике для отделения узлов и отсеков, в частности ступеней, головных частей, стартовых ускорителей и т.д. Так, например, в ракете-носителе «Протон» используется около 400 пироболтов. Конструкции пироболтов весьма разнообразны. По способу воздействия взрывчатого вещества на элементы конструкции корпуса пироболты делятся на два типа: пироболты, использующие для разрушения стенки корпуса ударную волну, образующуюся при детонации бризантного взрывчатого вещества, и пироболты, использующие давление газов, возникающих при подрыве пиротехнического заряда. По способу разделения на части они подразделяются на осколочные, со срезной перемычкой, с поршнем, срезные. Рассмотрены конструкции различных видов пироболтов, приведены их недостатки. Представлен разработанный в КБ «Южное» пироболт срезного типа с сегментами, использующий для разделения частей корпуса радиальные режущие усилия сегментов, размещенных в отверстиях цилиндрической части. Указанные сегменты приводятся в действие с помощью штока с уплотняющими кольцами и связанного с ним через резиновую прокладку поршня, движущегося под давлением газов, которые образуются во время срабатывания пиропатрона. Приведены следующие расчеты: прочностные с определением несущей способности корпуса; энергетические с обоснованием выбора пиропатрона, используемого для задействования пироболта. В разработанном пироболте срезного типа с сегментами части корпуса разъединяются без значительных ударных нагрузок и выделения в окружающее пространство высокотемпературных газов и осколков, обеспечивая надежное отделение отсеков и узлов без повреждения чувствительного оборудования.

Ключевые слова: разрывной болт, ударная волна, бризантное взрывчатое вещество, пиропатрон, электроразрыв, высокотемпературные газы.

Піроболти, або розривні болти, належать до піротехнічних пристроїв з монолітним корпусом, що складаються з оголовка, як правило з шестигранною поверхнею, і циліндричної частини з різьєю. Піроболти розділяються на частини за допомогою піротехнічного заряду, розміщеного всередині корпусу. Завдяки простоті конструкції, надійності і малому часу спрацювання піроболти широко застосовують в аерокосмічній техніці для відокремлення вузлів і відсіків, зокрема ступенів, головних частин, стартових прискорювачів тощо. Так, наприклад, у ракеті-носії «Протон» використано близько 400 піроболтів. Конструкції піроболтів досить різноманітні. За способом впливу вибухової речовини на елементи конструкції корпусу піроболти поділяють на два типи: піроболти, що використовують для руйнування стінки корпусу ударну хвилю, яка утворюється внаслідок детонації бризантної вибухової речовини, і піроболти, що використовують тиск газів, які виникають унаслідок підриву піротехнічного заряду. За способом розділення на частини їх поділяють на осколкові, зі зрізною перемичкою, з поршнем, зрізні. Розглянуто конструкції різних видів піроболтів, зазначено їх недоліки. Подано розроблений у КБ «Південне» піроболт зрізного типу з сегментами, що використовує для розділення частин корпусу радіальні різальні зусилля сегментів, розміщених в отворі циліндричної частини. Зазначені сегменти приводяться у дію за допомогою штока з ущільнювальними кільцями та зв'язаного з ним через гумову прокладку поршня, що рухається під тиском газів, які утворюються внаслідок спрацювання піропатрона. Наведено такі розрахунки: міцнісні з визначенням несучої здатності корпусу; енергетичні з обґрунтуванням вибору піропатрона, який використовується для задіявання піроболта. У розробленому піроболті зрізного типу з сегментами частини корпусу роз'єднуються без значних ударних навантажень і виділення в оточуючий простір високотемпературних газів та осколків, забезпечуючи надійне відокремлення відсіків і вузлів без пошкодження чутливого устаткування.

Ключові слова: розривний болт, ударна хвиля, бризантна вибухова речовина, піропатрон, електроразрыв, високотемпературні газы.

The pyrobolts, or explosive bolts, belong to the pyrotechnical devices with monolithic case consisting of the cap, as a rule with hexagonal surface, and of cylindrical part with thread. The pyrobolts are separated

into parts using the pyrotechnical charge placed inside the case. Owing to the simple design, reliability and short action time, the pyrobolts have found wide application in aerospace engineering for separation of assemblies and bays, in particular, stages, head modules, launching boosters, etc. So, for example, about 400 pyrobolts are used in the Proton launch vehicle. The designs of pyrobolts are markedly different. By method of explosive substance action on case structural elements, the pyrobolts are divided into two types: the pyrobolts using the shock wave formed at detonation of brisant explosive substance for case wall destruction and the pyrobolts using the pressure of gases arising at pyrotechnical charge blasting. By method of separation into parts, they are divided into fragmenting pyrobolts with ridge-cut, with piston, and shear pyrobolts. The paper deals with the design of various types of pyrobolts, their disadvantages are considered. The Yuzhnoye SDO-developed pyrobolt of shear type with segments is presented that uses radial shear forces of segments located in the hole of cylindrical part to separate the case parts. The above segments are actuated using a rod with sealing rings and a piston connected to the rod through a rubber gasket; the piston moves under pressure of gases formed during pyro cartridge action. The following calculations are presented: strength analyses with determination of case load-carrying capacity; power analyses with justification of pyro cartridge selection for pyrobolt actuation. In the developed pyrobolt of shear type with segments, the case parts are separated without considerable shock loads and without high-temperature gases and fragments release into environment, ensuring reliable separation of bays and assemblies without damaging sensitive equipment.

Key words: explosive bolt, shock wave, brisant explosive substance, pyro cartridge, electric igniting fuse, high-temperature gases.

Пироболты, или разрывные болты, – это пиротехнические устройства, относящиеся к исполнительным элементам систем разделения РН и служащие для крепления и отделения узлов или отсеков ступеней, головных частей, стартовых ускорителей, хвостовых отсеков и т.д. В пироболтах происходит разделение монолитного корпуса на две части в результате срабатывания пиротехнического заряда, размещенного внутри корпуса.

К современным пироболтам предъявляются следующие основные требования: минимальные масса и габариты, работоспособность в заданном температурном диапазоне, максимальная надежность, минимальное потребление электрической энергии при срабатывании, нечувствительность к динамическому нагружению и воздействию окружающей среды, минимальное динамическое воздействие на окружающие элементы конструкции, отсутствие вылетающих частей и осколков, простота конструкции и ее технологичность, взаимозаменяемость, минимальная стоимость, простота и безопасность эксплуатации, обеспечение заданных эксплуатационных характеристик. К достоинствам пироболтов следует отнести простоту конструкции, незначительную массу, небольшие габариты и быстроту срабатывания [1].

Конструкции пироболтов весьма разнообразны. По виду воздействия взрывчатого вещества на элементы конструкции корпуса различают два типа пироболтов: к пер-

вому относятся пироболты, использующие для разрушения стенки корпуса ударную волну, образующуюся при детонации бризантного заряда; второй тип использует для разделения корпуса давление газов, возникающее при взрыве и горении пиротехнического заряда. Преимущества пироболтов второго типа выражены в меньших ударных нагрузках, действующих на окружающие элементы конструкции и оборудование, и в отсутствии осколков и выделения высокотемпературных газов.

По способу разделения на части различают следующие виды пироболтов [2]:

- осколочные;
- со срезной перемычкой;
- с поршнем;
- срезные.

Осколочный пироболт состоит из корпуса в виде болта с оголовком и цилиндрической частью с резьбой и заряда бризантного взрывчатого вещества с электрозапалом, размещенных в полости, выполненной в корпусе со стороны оголовка. В основе работы приведенного выше разрывного болта лежит разрушение стенки корпуса с помощью бризантного взрывчатого вещества. Электрозапал инициирует детонацию бризантного взрывчатого вещества, которая генерирует ударную волну и высокотемпературные газы. Таким образом разрушается цилиндрическая часть корпуса с дальнейшим нарушением механической связи между элементами конструкции, со-

единяемыми пироболтом. Недостатками осколочных пироболтов являются выделение в окружающее пространство фрагментов конструкции и высокотемпературных продуктов сгорания взрывчатого вещества, а также большие ударные нагрузки, возникающие при срабатывании устройства [3].

Для разделения корпуса пироболта со срезной перемычкой используется ударная волна, образующаяся при подрыве бризантного взрывчатого вещества [4]. Пироболт со срезной перемычкой, изображенный на рис. 1, состоит из корпуса 2, выполненного в виде оголовка 3 и цилиндрической части 5 с резьбой; электрозапала 1 и бризантного взрывчатого вещества 4, расположенных в отверстии А корпуса 2. В цилиндрической части корпуса выполнена ослабляющая проточка Б.

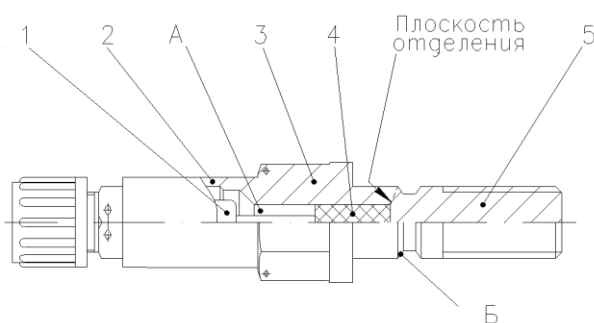


Рис. 1. Конструкция пироболта со срезной перемычкой:

- 1 – электрозапал; 2 – корпус; 3 – оголовок;
- 4 – бризантное взрывчатое вещество;
- 5 – цилиндрическая часть; А – отверстие в корпусе;
- Б – ослабляющая проточка

После срабатывания электрозапала и детонации бризантного взрывчатого вещества в пироболте генерируются ударные волны, которые проникают в стальную конструкцию корпуса. Когда ударные волны проходят наружную поверхность металла, они отражаются назад в качестве волн разряжения. В месте встречи волн, отраженных от цилиндрической поверхности и наклонной поверхности проточки, части металла перемычки двигаются в противоположных направлениях. Это движение создает высоконапряженное состояние, приводящее к разрушению перемычки и разделению частей пироболта. При этом образуются минимальное количество осколков и чистый срез (рис. 2).

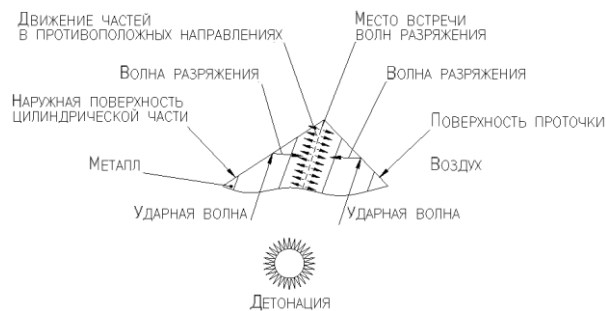


Рис. 2. Схема процесса разрушения перемычки

Недостатками пироболтов со срезной перемычкой являются выделение в окружающее пространство высокотемпературных продуктов сгорания взрывчатого вещества и большие ударные нагрузки.

Пироболт поршневого типа [5], представленный на рис. 3, включает в себя корпус 2, состоящий из оголовка 6 и цилиндрической части 8, электрозапал 1, пирозаряд 3, поршень 4 со штоком 7 и уплотнительными кольцами 5, размещенными в полости А, выполненной со стороны оголовка. На стенке цилиндрической части имеется кольцевая ослабляющая канавка Б.

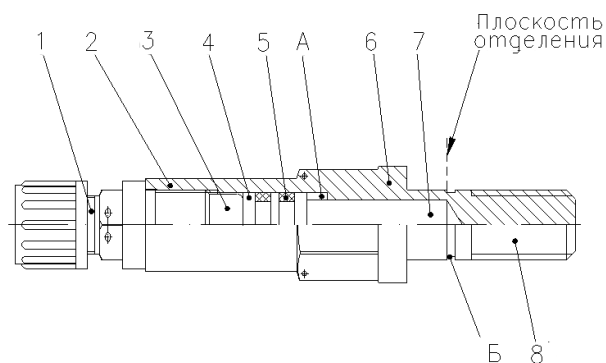


Рис. 3. Конструкция пироболта с поршнем:

- 1 – электрозапал; 2 – корпус; 3 – пирозаряд;
- 4 – поршень; 5 – уплотнительные кольца;
- 6 – оголовок; 7 – шток; 8 – цилиндрическая часть;
- А – полость; Б – ослабляющая канавка

В необходимое для разделения пироболта время на электрозапал подается электрический сигнал для воспламенения пирозаряда. Образующиеся при этом ударная взрывная волна и расширяющиеся высокотемпературные газы одновременно воздействуют на поршень, шток которого обеспечивает дав-

ление на корпус пироболта до его разрушения по месту ослабляющей канавки, осуществляя тем самым разделение. Благодаря наличию в конструкции уплотняющих колец выделяющиеся при срабатывании пирозаряда газы не покидают внутренней полости пироболта. Недостатком разрывных болтов поршневого типа являются относительно большие ударные нагрузки, негативно воздействующие на чувствительное оборудование.

Приведенный на рис. 4 пироболт срезного типа [6] состоит из электрозапала 1, пиротехнического заряда 3, поршня 4 со штоком 6, уплотнительных колец 5 и корпуса 2. Корпус 2 содержит оголовок 7 и цилиндрическую часть 8 с резьбой, к которой при установке пироболта на место стыка узлов или отсеков крепится гайка. Со стороны оголовка 7 в корпусе 2 имеется отверстие А. Для закрепления корпуса на наружной поверхности оголовка 7 выполнена резьба. Материал корпуса – термостойкая сталь 1Cr11Ni2W2MoV, материал поршня – пружинная сталь 60Si2MnA. В зоне среза на торце оголовка 7 корпуса 2 выполнено ослабление Б.

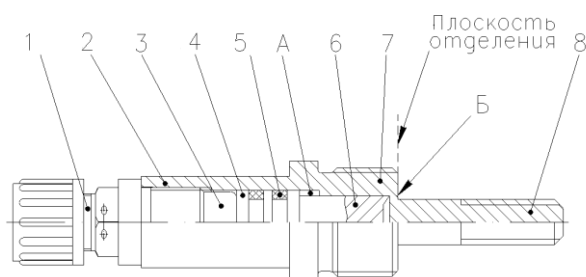


Рис. 4. Конструкция пироболта срезного типа:
1 – электрозапал; 2 – корпус; 3 – пиротехнический заряд; 4 – поршень; 5 – уплотнительные кольца; 6 – шток; 7 – оголовок; 8 – цилиндрическая часть; А – отверстие; Б – ослабление

В необходимый для разделения болта момент подается электрическая команда в электрозапал, инициирующий пиротехнический заряд, в результате чего в рабочей камере корпуса пироболта образуется высокотемпературный газ. Под воздействием давления газа поршень двигается до упора в

корпусе со срезанием стенки торца оголовка, при этом газы удерживаются в рабочей камере с помощью уплотнительных колец. Недостатками приведенной конструкции срезного разрывного болта являются увеличенные габариты места стыка и отделяемой резьбовой части (за счет диаметра фланца днища), необходимость фиксации оголовка корпуса, относительно большие ударные нагрузки.

Для создания пироболта с небольшим динамическим воздействием на окружающие элементы конструкции и оборудование, отсутствием осколков после срабатывания и небольшими габаритными размерами предложено использовать для разделения частей корпуса пироболта радиальные режущие усилия сегментов, размещенных в отверстии цилиндрической части. Указанные сегменты приводятся в действие с помощью штока с уплотнительными кольцами и связанного с ним через резиновую прокладку поршня,двигающегося под давлением газов, которые образуются во время срабатывания пиропатрона (рис. 5).

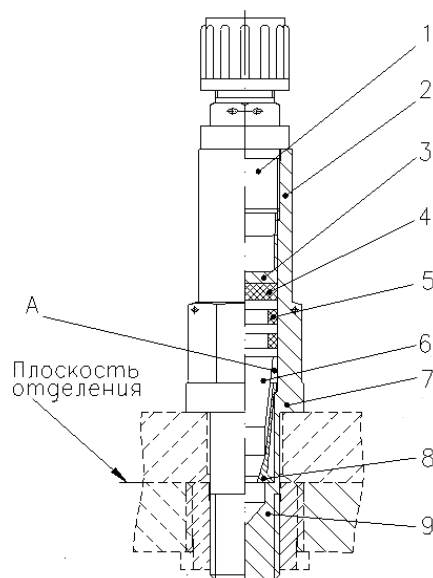


Рис. 5. Конструкция пироболта срезного типа с сегментами:
1 – пиропатрон; 2 – корпус; 3 – поршень; 4 – демпфирующая прокладка; 5 – резиновые уплотнения; 6 – шток; 7 – оголовок; 8 – сегменты; 9 – цилиндрическая часть; А – ступенчатое отверстие

Пироболт срезного типа с сегментами состоит из пиропатрона 1, поршня 3, демпфирующей прокладки 4, штока 6 с резиновыми уплотнениями 5, сегментов 8 и корпуса 2. Корпус 2 содержит оголовки 7 и цилиндрическую часть 9 с резьбой. В середине корпуса 2 со стороны оголовка 7 выполнено ступенчатое отверстие А. Сегменты 8 установлены на внутреннем буртике отверстия А. Коническая поверхность штока 6 контактирует с внутренней конической поверхностью сегментов 8, режущие кромки которых упираются в стенку отверстия А.

Функционирование пироболта срезного типа с сегментами происходит следующим образом. В необходимом для разделения соединенных пироболтом отсеков или узлов время от системы управления подается электрическая команда на задействование пиропатрона 1. Высокотемпературные газы, образовавшиеся после его срабатывания, давят на поршень 3, который через резиновую прокладку 4 приводит в движение шток 6. При этом резиновая прокладка 4 уменьшает возмущения и ударные нагрузки, возникающие при срабатывании пиропатрона 1, а резиновые уплотнения 5 не дают газам попасть в окружающую среду. Во время движения штока 6 его конусная часть давит на внутренние конические части сегментов, которые, двигаясь в радиальном направлении, перерезают своими острыми режущими кромками стенку цилиндрической части корпуса с дальнейшей ее развальцовкой. На рис. 6 изображена часть пироболта с оголовком, зафиксированная на остающемся отсеке с помощью развальцовки.

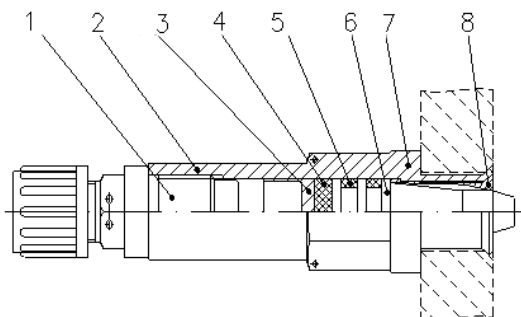


Рис. 6. Часть пироболта срезного типа с сегментами после срабатывания:

1 – пиропатрон; 2 – корпус; 3 – поршень; 4 – демпфирующая прокладка; 5 – резиновые уплотнения; 6 – шток; 7 – оголовок; 8 – сегменты

С целью подтверждения возможности разделения частей пироболта с помощью сегментов в КБ «Южное» разработана опытная конструкция с резьбой М12×1,5 в цилиндрической части, толщиной стенки в месте среза 1 мм и максимальной осевой разрушающей нагрузкой 4800 кгс.

Определяющей задачей при разработке пироболта срезного типа с сегментами было использование для его задействования одного из трех стандартных серийно выпускаемых пиропатронов:

- ДИШВ.773924.406 (ПС-1) с воспламеняющим составом 0,3 г;
- ДИШВ.773924.406-01 с воспламеняющим составом 0,5 г;
- ДИШВ.773924.406-02 (ПС-1-1) с воспламеняющим составом 0,7 г.

Для выбора типа пиропатрона произведем ориентировочные энергетические расчеты.

Энергия газов, образовавшихся при срабатывании пиропатрона

$$E=pV,$$

где p – давление газов; V – объем рабочей камеры пироболта.

Выделившаяся энергия газов пиропатрона идет на совершение работы силой, срезающей стенку пироболта

$$A=F_{cp} \delta,$$

где F_{cp} – усилие среза; δ – толщина стенки цилиндрической части пироболта в месте установки сегментов.

По закону сохранения энергии

$$pV= F_{cp} \delta.$$

Усилие среза

$$F_{cp}= \sigma_{cp} \pi d_o \delta,$$

где σ_{cp} – напряжение среза; d_o – диаметр отверстия.

Отсюда

$$pV= \sigma_{cp} \pi d_o \delta^2.$$

Учитывая, что $\sigma_{cp}=0,6\sigma_B$, давление, которое необходимо развить в рабочей камере

$$p= 0,6\sigma_B \pi d_o \delta^2 / V.$$

Для стали 03Х11Н10М2Ф – материала корпуса – $\sigma_B=14000$ кгс/см².

Объем рабочей камеры пироболта $V=0,5$ см³, диаметр отверстия $d_o=10$ мм, толщина стенки $\delta=1$ мм.

Подставив значения, получаем $p=8400 \cdot 3,14 \cdot 0,01 / 0,5 = 527$ кгс/см².

Рассмотрев графики зависимости давления P от объема рабочей камеры V для пиропатронов, определяем, что для данного вида пироболта с диаметром шпильки 12 мм и толщиной стенки 1 мм подходит пиропатрон ДИШВ.773924.406-01, для которого график зависимости P от V представлен на рис. 7.



Рис. 7. График зависимости давления P от объема рабочей камеры V для пиропатрона ДИШВ.773924.406-01

Проведем оценку несущей способности пироболта путем определения максимального усилия затягивания, направление приложения которого указано на рис. 8.

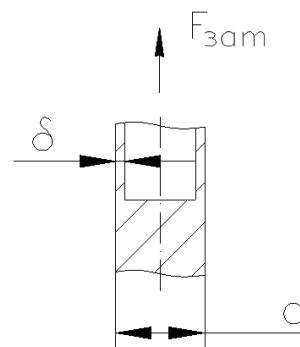


Рис. 8. Приложение затягивающей силы к цилиндрической части

Вдоль оси корпуса пироболта при затяжке действуют нормальные и касательные напряжения, рассчитываемые по формулам (1), (2) соответственно:

$$\sigma = \frac{F_{зам}}{\pi(d - \delta)\delta}, \quad (1)$$

где d – диаметр цилиндрической части; δ – толщина стенки в месте установки сегментов;

$$\tau = \frac{M_{кр}}{W_p}, \quad (2)$$

где $M_{кр}$ – момент кручения на резьбовой части болта;

$$W_p = \frac{\pi d^3}{16} \left(1 - \left(\frac{\delta}{d} \right)^4 \right) \approx \frac{\pi d^3}{16}.$$

Для плоского напряженного состояния

$$\sigma_\beta = \sigma; \tau_\beta = \tau; \sigma_\alpha = 0; \tau_\alpha = \tau. \quad (3)$$

Главные напряжения

$$\sigma_1 = \frac{1}{2} \left[\sigma_\alpha + \sigma_\beta + \sqrt{(\sigma_\alpha - \sigma_\beta)^2 + 4\tau_\alpha^2} \right];$$

$$\sigma_3 = \frac{1}{2} \left[\sigma_\alpha + \sigma_\beta - \sqrt{(\sigma_\alpha - \sigma_\beta)^2 + 4\tau_\alpha^2} \right].$$

С учетом (3)

$$\sigma_1 = \frac{1}{2} \left[\sigma + \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2} \right]; \quad (4)$$

$$\sigma_3 = \frac{1}{2} \left[\sigma - \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2} \right]. \quad (5)$$

По IV теории прочности

$$\sigma_3 = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_3^2} - \sigma_1 \cdot \sigma_3 \leq [\sigma]. \quad (6)$$

Подставив (4), (5) в (6), получим

$$\sigma_s = \sqrt{\sigma^2 + 2,25\tau^2}.$$

Так как

$$F_{зат.маx} \approx 12,5 \frac{M_{кр}}{d} \rightarrow M_{кр} = \frac{F_{зат} d}{12,5},$$

формулу (2) можно записать в виде

$$\tau = \frac{F_{зат} d 16}{12,5 \pi d^3} = 0,4 \frac{F_{зат}}{d^2}.$$

После подстановки полученных выражений в (6) найдем допустимое из условия прочности усилие затяжки

$$F_{зат.маx} \leq [\sigma] \frac{\pi d \cdot \delta}{\sqrt{1 + 3,6 \left(\frac{\delta}{d}\right)^2}}.$$

Для $\delta/d < 0,2$ $F_{зат.маx} \leq \pi d \delta [\sigma]$, где $[\sigma] = \sigma_m / 1,25$.

Учитывая, что предел текучести стали 03X11Н10М2Ф $\sigma_m = 85$ кгс/мм²,

$$F_{зат.маx} \leq 214 d \delta.$$

При $d=12$ мм и $\delta=1$ мм максимальное усилие затяжки пироболта $F_{зат.маx}=2568$ кгс.

Для подтверждения расчетов изготовлена опытная конструкция пироболта срезного типа с сегментами и проведено его срабатывание. Фотография разделившихся частей пироболта приведена на рис. 9.



Рис. 9. Части пироболта срезного типа с сегментами после срабатывания

Выводы

Рассмотрены конструкции пироболтов в соответствии с классификацией, приведенной в [2].

Расчетным и экспериментальным путем подтверждена возможность создания пироболта, корпус которого перерезается в радиальном направлении размещенными внутри него сегментами с режущими кромками, приводящимися в движение штоком, который перемещается давлением газов от срабатывания пиропатрона. Разрезание цилиндрической части пироболта сопровождается завальцовкой его корпуса в месте среза, фиксирующей его оголовок на остающемся отсеке.

Разработанная в КБ «Южное» конструкция пироболта срезного типа с сегментами позволяет разъединять части корпуса без значительных ударных нагрузок, выделения в окружающее пространство высокотемпературных газов и осколков, обеспечивая надежное отделение отсеков и узлов без повреждения чувствительного оборудования.

Список использованной литературы

1. Машиностроение. Энциклопедия / А. П. Аджян и др.; под ред. В. П. Легостаева. М., 2012. Т. IV-22. В 2-х кн. Кн. 1. 925 с.
2. Bement L. J., Schimmel M. L. A Manual for Pyrotechnic Design, Development and Qualification: NASA Technical Memorandum 110172. 1995.
3. Юмашев Л. П. Устройство ракет-носителей (вспомогательные системы): учеб. пособ. Самара, 1999. 190 с.
4. Lee J., Han J.-H., Lee Y., Lee H. Separation characteristics study of ridge-cut explosive bolts. *Aerospace Science and Technology*. 2014. Vol. 39. P. 153-168.
5. Yanhua L., Jingcheng W., Shihui X., Li C., Yuquan W., Zhiliang L. Numerical Study of Separation Characteristics of Piston-Type Explosive Bolt. *Shock and Vibration*. <https://doi.org/10.1155/2019/2092796>.
6. Yanhua L., Yuan L., Xiaogan L., Yuquan W., Huina M., Zhiliang L. Identification of Pyrotechnic Shock Sources for Shear Type Explosive Bolt. *Shock and Vibration*. <https://doi.org/10.1155/2017/3846236>.

Статья поступила 21.06.2019