

Д. А. Коденец, С. А. Сенча, А. А. Макаренко

## ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРИСПОСОБЛЕНИЯ ДЛЯ СБОРКИ СИСТЕМ ОТДЕЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ТИПА CLAMP BAND

Рассмотрены особенности создания технологического обжимного приспособления для сборки бандажного устройства крепления системы отделения космического аппарата типа Clamp Band. Обжимное приспособление предназначено для обеспечения равномерного распределения усилий натяжения в бандажных поясах при сборке бандажного устройства крепления, что позволяет минимизировать нагрузку на пирозамки-толкатели и тем самым обеспечить надежность их срабатывания. Приспособление состоит из прижимных механизмов, расположенных по окружности симметрично плоскости стыка бандажных поясов и закрепленных на подставке с регулируемыми опорами. Прижимной механизм представляет собой конструкцию, поводковая кинематическая схема которой позволяет компенсировать монтажные погрешности сборки, неблагоприятные стечения допусков, избежать появления радиальной нагрузки на упорном винте. Однако при отработке технологии сборки бандажного устройства крепления в прижимных механизмах были обнаружены заедание резьбового соединения в результате смятия витка упорного винта в районе первого витка вкладыша, люфт в резьбе после многократного использования, царапины и незначительные задиры на конической поверхности прижима, неудобство работы двумя ключами. Для устранения данных дефектов втулка с вкладышем была заменена на втулку с выступающей частью, что позволило более равномерно распределить нагрузку по всем виткам. Проведена замена материала винта и гайки исходя из соотношения между пределами прочности:  $\sigma_s$  стержня  $> 1,3 \sigma_s$  гайки. Изменена конструкция прижимного механизма в части соединения упорного винта с прижимом, что позволило уменьшить нагрузку на винтовую пару вследствие передачи осевого усилия от сферической поверхности винта на плоскую поверхность прижима, уменьшить момент затяжки для обеспечения расчетной силы крепления бандажных поясов и облегчить процесс сборки и разборки прижимных механизмов. В результате доработок была получена технологичная и эргономичная конструкция обжимного приспособления, применение которой при сборке бандажного устройства крепления позволяет равномерно распределить усилия обжатия по бандажным поясам, что обеспечивает надежность работы системы отделения космического аппарата.

**Ключевые слова:** бандажное устройство крепления, обжатие полуколец, равномерное усилие натяжения, прижимной механизм.

Розглянуто особливості створення технологічного обжимного пристрою для складання бандажного пристрою кріплення системи відокремлення космічного апарата типу Clamp Band. Обжимний пристрій призначено для забезпечення рівномірного розподілу зусиль натягу в бандажних поясах під час складання бандажного пристрою кріплення, що дозволяє мінімізувати навантаження на пирозамки-штовхачі й у такий спосіб забезпечити надійність їх спрацювання. Пристрій складається з притискних механізмів, розміщених по колу симетрично площині стику бандажних поясів і закріплених на підставці з регульованими опорами. Притискний механізм є конструкцією, повідкова кінематична схема якої дозволяє компенсувати монтажні похибки складання, несприятливі збіги допусків, уникнути появи радіального навантаження на упорному гвинті. Проте під час відпрацювання технології складання бандажного пристрою кріплення у притискних механізмах було виявлено заїдання нарізного з'єднання у результаті зминання витка упорного гвинта поблизу першого витка вкладыша, люфт у різі після багаторазового використання, наявність подряпин і незначних задирок на конічній поверхні притискача, незручність роботи двома ключами. Для усунення цих дефектів втулку із вкладышем було замінено на втулку з виступною частиною, що дозволило більш рівномірно розподілити навантаження по всіх витках. Замінено матеріал гвинта та гайки на основі співвідношення між границями міцності:  $\sigma_s$  стержня  $> 1,3 \sigma_s$  гайки. Змінено конструкцію притискного механізму щодо з'єднання упорного гвинта з притискачем, що дозволило зменшити навантаження на гвинтову пару внаслідок передачі осьового зусилля від сферичної поверхні гвинта на плоску поверхню притискача, зменшити момент затяжки для забезпечення розрахункової сили кріплення бандажних поясів і полегшити процес складання й розбирання притискних механізмів. У результаті дороблень одержано технологічну й ергономічну конструкцію обжимного пристрою, застосування якої для складання бандажного пристрою кріплення дозволяє рівномірно розподілити зусилля обжаття по бандажних поясах, що забезпечує надійність роботи системи відокремлення космічного апарата.

**Ключові слова:** бандажний пристрій кріплення, обжимання півкілець, рівномірне зусилля натягу, притискний механізм.

The article deals with the peculiarities of creation of technological crimping device for assembling the spacecraft separation system clamp band. The crimping device is intended to ensure uniform distribution of tension forces in the clamp band belts during assembling of the attachment clamp band, which allows minimizing the load on pyrolocks-pushers and thereby ensuring their operation reliability. The device consists of pressing mechanisms located along circumference symmetrically to the clamp band belts interface plane and fixed on a rest with adjustable supports. The pressing mechanism is a structure with driving kinematic scheme, which allows compensating for mounting errors, unfavorable combination of tolerances, avoiding occurrence of radial load on the thrust screw. However, during testing of the clamp band assembling technology, jamming of threaded connection as a result of thrust screw turn crush in the area of first turn of insert, gap in the thread after multiple use, scratches and minor scores on the conical surface of pressing mechanism, hardship of work with two wrenches were detected. To remove these defects, the sleeve with insert was replaced by the sleeve with protruding part, which allowed distributing the load in all turns more uniformly. The material of nut and screw was replaced based on relation between the strength limits:  $\sigma_s$  of rod  $> 1.3 \sigma_s$  and nut. The design of pressing mechanism was changed in respect of connection of thrust screw with hold-down, which allowed decreasing the load on screw pair as a consequence of axial force transfer from screw's spherical surface to flat surface of hold-down, decreasing the tightening moment to ensure design force of clamp band belts fixation and making the process of pressing mechanisms assembling and disassembling easier. As a result of the updates, the manufacturable and ergonomic structure of crimping device was obtained, the use of which during assembling of the clamp band allows uniformly distributing the crimping forces in clamp band belts, which ensures reliability of spacecraft separation system operation.

**Key words:** clamp band, half-rings crimping, uniform tension force, pressing mechanism.

### Введение

Разработка технологических приспособлений, которые обеспечивают надежное и удобное изготовление узлов и агрегатов, их сборку, настройку и т.д., иногда бывает не менее сложна, чем основного устройства систем ракетной техники.

Рассмотрим один из элементов процесса сборки системы отделения космического аппарата – бандажное устройство крепления (БУК) (по зарубежному классификатору устройство Clamp Band).

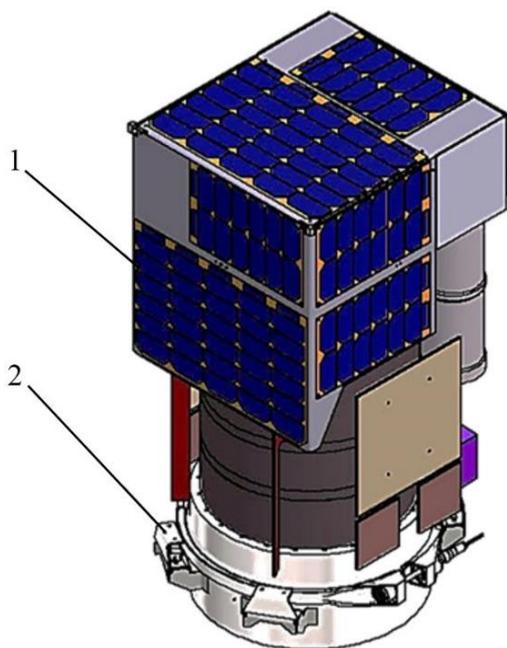


Рис. 1. Система отделения КА:  
1 – БУК; 2 – КА

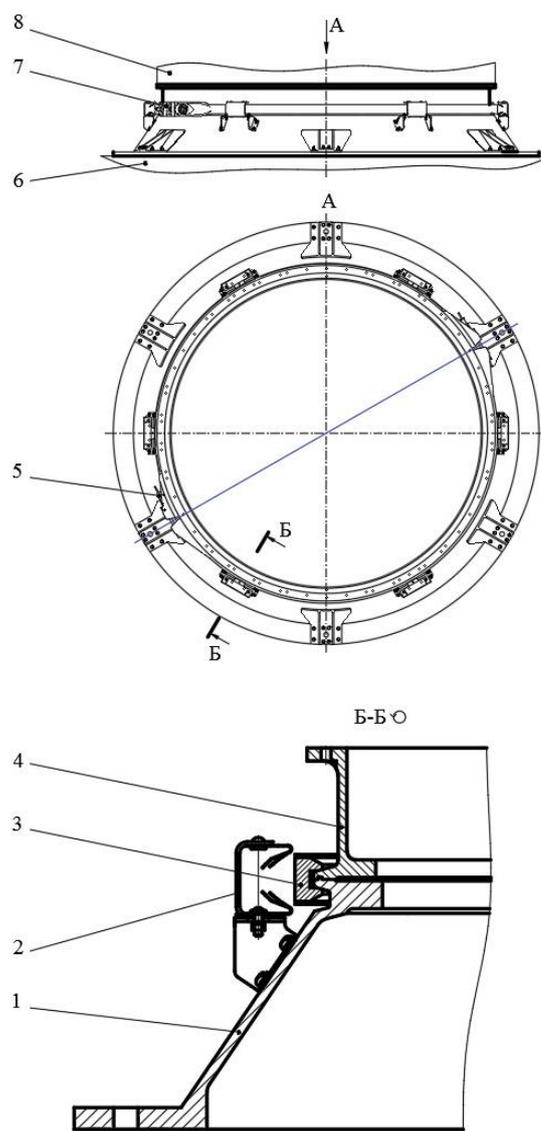


Рис. 2. Бандажное устройство крепления:  
1 – нижнее кольцо; 2 – ловители; 3 – верхнее кольцо;  
4 – пирозамок-толкатель; 5 – РН; 6 – БУК; 7 – КА

БУК КА (рис. 2), для обеспечения сборки которого разрабатывается приспособление, состоит из верхнего кольца (часть КА), нижнего кольца (часть РН) и двух полуколец бандажного пояса, обжимающих конические полки стыковочных шпангоутов верхнего и нижнего колец, стянутых между собой пирозамками-толкателями.

При отработке технологии сборки БУК КА столкнулись со сложностью получения равномерного натяжения бандажных полуколец. Достижение равномерного усилия натяжения обеспечивает большее суммарное усилие стягивания стыка КА с РН, что позволяет при тех же габаритах БУК увеличить массу полезной нагрузки на 20-30%.

Сложность обеспечения равномерного обжатия объясняется формулой Эйлера, описывающей распределение усилий натяжения в бандажном поясе:

$$T = P_3 \cdot e^{-f^* \cdot \gamma},$$

где  $T$  – усилие натяжения в бандаже;

$P_3$  – усилие затяжки пирозамка;

$f^*$  – приведенный коэффициент трения,

$$f^* = \frac{f}{\sin \alpha + f \cdot \cos \alpha};$$

$\gamma$  – угловая координата, которая отсчитывается от торца бандажа, к которому приложено усилие затяжки пирозамка  $P_3$ ;

$f$  – коэффициент трения трущейся пары;

$\alpha$  – угол конусности фланца.

Значения усилий натяжения в бандажном полукольце в центре и местах натяжения пирозамками могут отличаться почти в два раза.

Исходя из требования к равномерности обжатия поясов БУК при стыковке КА с адаптером РКН была предложена схема для разработки технологического приспособления (рис. 3).

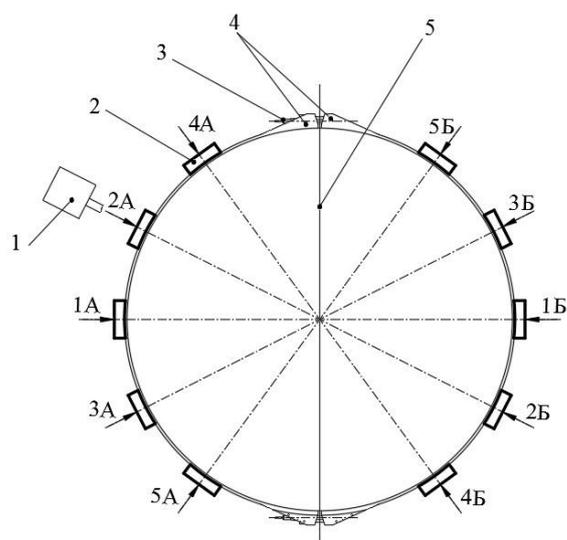


Рис. 3. Схема расположения пирозамков-толкателей, прижимов прижимных механизмов и направления действия прижимных сил:

- 1 – прижимной механизм; 2 – прижим прижимного механизма; 3 – пирозамок-толкатель; 4 – бандажный пояс; 5 – плоскость разделения бандажных полуколец;
- ↙ – направление действия прижимной силы;
- 1А, 2Б ... – обозначение прижимных механизмов

### Проектирование приспособления и разработка КД

В процессе разработки конструкторской документации непосредственно на БУК проводился анализ требований к его изготовлению и сборке. На этом этапе была предложена конструкция обжимного приспособления, в которой прижимные механизмы расположены по окружности симметрично плоскости стыка бандажных поясов и закреплены на подставке с регулируемыми опорами (рис. 4). В подставке предусмотрены посадочные отверстия для установки БУК КА.

Основным силовым узлом приспособления является прижимной механизм. Он должен обеспечивать требуемые усилия поджатия, многократное применение и большой ресурс, простоту и технологичность изготовления, поджатие без специальных силовых приводов за счет усилий слесаря-сборщика, иметь минимальную зону обслуживания.

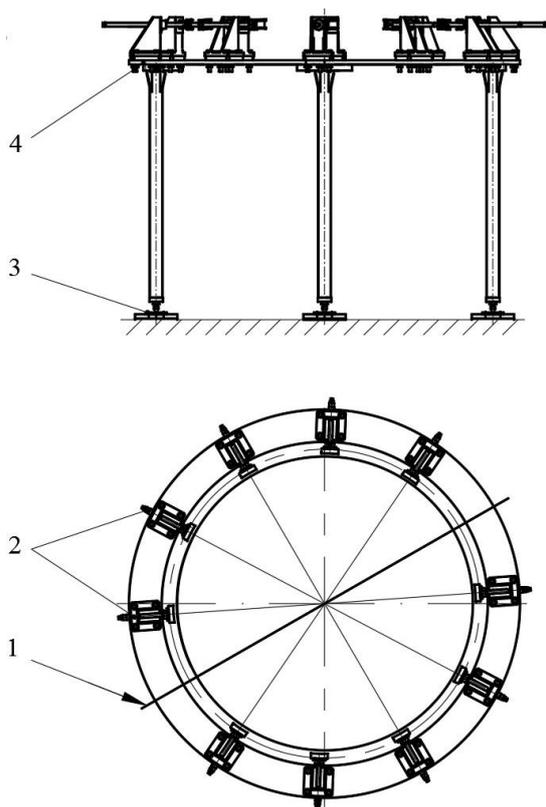


Рис. 4. Обжимное приспособление:  
1 – плоскость стыка бандажных поясов;  
2 – прижимной механизм; 3 – регулируемые опоры;  
4 – подставка

Рассматривались различные конструкции прижимного механизма. В результате детальных проработок был выбран вариант механизма, состоящего из кронштейна, втулки с вкладышем, упорного винта со скобой, охватывающей бандажный пояс БУК (рис. 5).

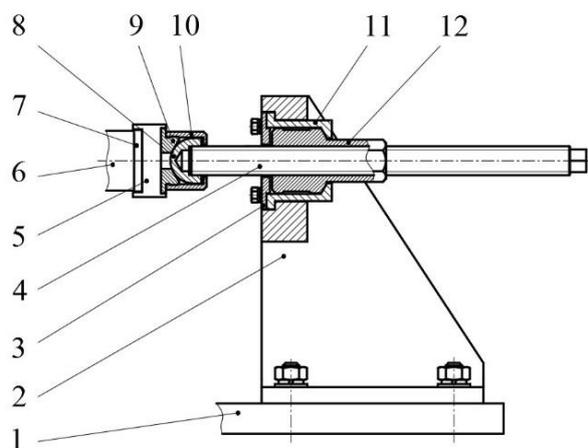


Рис. 5. Прижимной механизм поводкового типа:  
1 – подставка; 2 – кронштейн; 3 – крышка;  
4 – упорный винт; 5 – скоба; 6 – бандажный пояс;  
7 – прокладка; 8 – сферический упор; 9 – накладка;  
10 – накидная гайка; 11 – втулка; 12 – вкладыш

В данной конструкции имеются два шарнира: соединение сферической поверхности вкладыша и конической поверхности втулки и соединение сферической поверхности упора и конической поверхности накладки. С помощью этих двух шарниров реализована поводковая кинематическая схема, которая позволяет компенсировать монтажные и механические погрешности сборки, неблагоприятные стечения допусков в сопрягаемых деталях, избежать появления радиальной нагрузки (изгиба) на стержне.

### Изготовление приспособления

При изготовлении деталей прижимного механизма был выявлен ряд технологических особенностей, которые не были учтены в КД:

- в связи со значительным короблением кронштейна из стали 12Х18Н10Т после сварки возникла необходимость увеличить высоту основания кронштейна для последующей механической обработки;

- при выполнении диаметрального размера в скобе было предложено выполнять одновременную обработку десяти деталей (комплект для одного обжимного приспособления) на карусельном станке, что значительно ускорило процесс изготовления обжимного приспособления;

- с целью введения технологических улучшений была изменена конструкция крепления прокладки к скобе и т.д.

### Отработка технологии сборки с применением технологического приспособления

Была разработана специальная технология монтажа БУК как в условиях цеховой сборки, так и в условиях монтажно-испытательного комплекса на космодроме, согласно которой работа приспособления осуществляется следующим образом: на плиту подставки устанавливается БУК КА и фиксируется с помощью крепежных элементов. После предварительной фиксации бандажных поясов на фланцах соединяемых колец (нижнего и верхнего) осуществляется обжатие с помощью прижимных механизмов в несколько этапов с постепенным повышением усилия прижатия. Затягивание осуществляется с помощью моментного ключа в определенной очередности прижимных

механизмов с расчетным моментом затяжки, в результате чего создается равномерное радиальное прижимное усилие, которое передается на бандажный пояс.

На рис. 6 приведен график распределения усилия натяжения в бандажном полукольце, полученный в процессе испытаний после обжатия. Для сравнения на рисунке приведены графики распределения усилия, полученные при сборке БУК без применения приспособления.

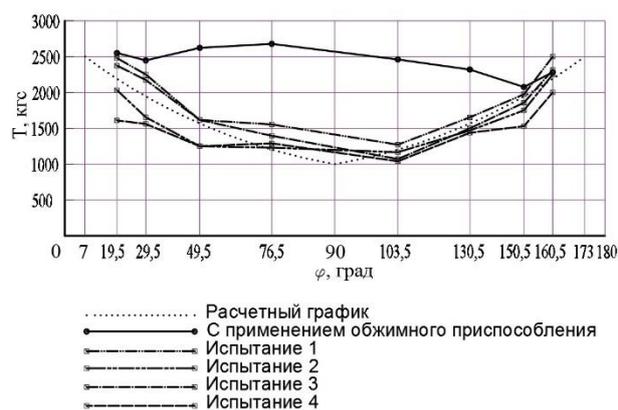


Рис. 6. Сравнение расчетных и экспериментальных графиков распределения усилия натяжения по бандажному полукольцу

При проведении сборки БУК одновременно проводилась отработка технологии сборки и испытания технологического приспособления. Было обнаружено заедание резьбового соединения вкладыша и упорного винта в результате смятия витка упорного винта в районе первого витка вкладыша; люфт в резьбе после многократного использования; неудобство работы двумя ключами (вращая вкладыш моментным ключом, необходимо было придерживать ключом упорный винт от проворота).

#### Анализ недостатков конструкции прижимного механизма

В результате анализа недостатков конструкции, выявленных в процессе сборки БУК, было установлено следующее:

а) в соединениях типа «болт-гайка» первый виток от торца гайки является самым нагруженным (30-40 % всей нагрузки) [1, с. 91];

б) для уменьшения нагрузки на 1-й виток и равномерного распределения нагрузки по виткам [1, 2] рекомендуется вместо соединения типа «болт-гайка» использовать соединение типа «стяжка» (так называемые висячие гайки), при котором направление усилия (сжатия) в болте (стержне) совпадает с направлением усилия (сжатия) в гайке (в существующей конструкции стержень работает на сжатие, а гайка – на растяжение), при этом нагрузка на первый виток уменьшается в два раза и более и равномерно распределяется по всем виткам [1, с. 81-83];

в) люфт в резьбе между гайкой и стержнем объясняется разрушением резьбы вследствие существенного различия механических свойств гайки и стержня, неправильного выбора материала гайки и стержня, а также вследствие их многократного применения (до 100 раз);

г) рекомендуется [1] для резьбовых соединений применять следующее соотношение между пределами прочности стержня и гайки:  $\sigma_{\text{в стержня}} \geq 1,3 \sigma_{\text{в гайки}}$  (в существующей конструкции:  $\sigma_{\text{в стержня}}$  (100 кг/мм<sup>2</sup> – для 09Х16Н4Б, НРС 29-37) <  $\sigma_{\text{в гайки}}$  (110 кг/мм<sup>2</sup> – для 30ХГСА, НРС 36-39,5).

#### Корректировка КД на приспособление

В процессе устранения замечаний были проведены:

– замена материала винта с 09Х16Н4Б на 30ХГСА ( $\sigma_{\text{в}}=110$  кг/мм<sup>2</sup>) с покрытием Кд9.хр и материала втулки с 30ХГСА на сталь 45 ( $\sigma_{\text{в}} = 65$ кг/мм<sup>2</sup>) с покрытием Кд6.хр, при этом обеспечено соотношение  $\sigma_{\text{в стержня}} > 1,3 \sigma_{\text{в гайки}}$ ;

– изменение конфигурации прижимного механизма: вкладыш с втулкой были заменены на втулку с выступающей частью, что позволило уменьшить нагрузку на первый виток и более равномерно распределить нагрузку по всем виткам. Конструкция прижимного механизма приобрела следующий вид (рис. 7).

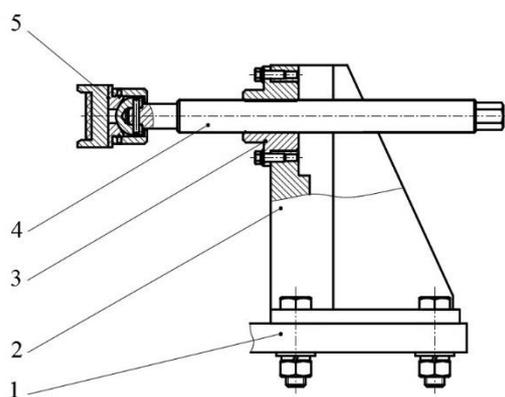


Рис. 7. Конструкция прижимного механизма после корректировки КД:  
1 – подставка; 2 – кронштейн; 3 – втулка;  
4 – упорный винт; 5 – прижим

При проведении дальнейших функциональных испытаний БУК с использованием прижимных механизмов с измененной конструкцией смятия резьбы и люфта не обнаружено.

#### Разработка прижимных приспособлений для последующих изделий с учетом накопленного опыта и оптимизации конструкции

Разработанное технологическое обжимное приспособление хорошо зарекомендовало себя при интеграции на ракету-носитель «Днепр» зарубежных КА Kompsat-3A, ASNARO. Предполагается его использование и в будущих проектах предприятия. Анализ технологии сборки, осмотр механизмов после применения позволили сформулировать некоторые рекомендации по улучшению конструкции.

При проведении дефектации прижимных механизмов после их применения для сборки БУК были обнаружены царапины и незначительные задиры на конической поверхности прижима. Данные дефекты возникали из-за повышенного трения при передаче осевого усилия через сферическую поверхность упорного винта при его вращении на коническую поверхность прижима (рис. 8, а).

С целью устранения обнаруженных недостатков было принято решение изменить конструкцию в части соединения упорного винта с прижимом.

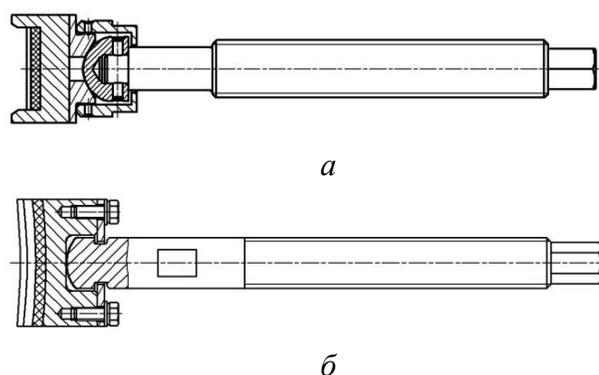


Рис. 8. Варианты конструкции упорного винта с прижимом

В измененной конструкции упорного винта (рис. 8, б) осевое усилие через сферическую поверхность передается на плоскую поверхность прижима. При такой конструкции упорного винта с прижимом необходимо ужесточить допуски на размеры кронштейна и втулки и на их предельные отклонения формы и расположения поверхностей, а также расширить паз в прижиме, который охватывает бандажный пояс. При проведении сравнительного анализа данных конструкций (рис. 8, а, б) был проведен расчет момента затяжки  $M$  для обеспечения расчетной силы закрепления бандажных поясов и КПД [3, с. 384-389]:

$$M = P_3 \cdot [0,5 \cdot d_2 \cdot \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_{\text{пр}}) + f_1 \cdot R \cdot \operatorname{ctg}(\gamma/2)];$$

$N = \operatorname{tg} \alpha / [\operatorname{tg}(\alpha + \varphi_{\text{пр}}) + 2R/d_2 \cdot f_1 \cdot \operatorname{ctg}(\gamma/2)]$  для конструкции, показанной на рис. 8, а;

$$M = 0,5 \cdot P_3 \cdot d_2 \cdot \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_{\text{пр}});$$

$N = \operatorname{tg} \alpha / \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_{\text{пр}})$  для конструкции, показанной на рис. 8, б.

Анализ результатов показал, что предлагаемая конструкция упорного винта с прижимом (рис. 8, б) позволяет: уменьшить расчетный момент затяжки приблизительно в два раза ( $108 \text{ кгс} \cdot \text{см} < 217 \text{ кгс} \cdot \text{см}$ ) и, следовательно, уменьшить нагрузку на резьбовую пару; повысить КПД винтового механизма ( $0,1756 > 0,092$ ); повысить технологичность упорного винта прижимного механизма (уменьшить количество деталей и упростить процесс сборки или разборки); избежать задигов, заеданий; удешевить и упростить конструкцию прижимных механизмов.

### **Выводы**

При создании и внедрении обжимного приспособления для установки БУК были проведены комплекс расчетных и проектно-конструкторских работ, отработок технологии сборки и стыковки КА, наземная экспериментальная отработка, в процессе которых технологическое приспособление дорабатывали и совершенствовали. В результате получили технологичную и эргономичную конструкцию, которая позволяет равномерно распределить усилия прижима по бандажным поясам. При этом обеспечены простота конструкции и изготовление из общедоступных материалов. Достижение равномерного усилия натяжения обеспечивает большее суммарное усилие стягивания стыка КА с РН, что позволяет при тех же габаритах БУК увеличить массу полезной нагрузки.

Конструкция данного приспособления защищена патентом Украины [4].

### **Список использованной литературы**

1. Биргер И. А., Иосилевич Г. Б. Резьбовые и фланцевые соединения. М., 1990. 368 с.
2. Орлов П. И. Основы конструирования: Справ.-метод. пособие в 3-х книгах. Кн. 1. 2-е изд., перераб. и доп. М., 1977. 623 с.
3. Станочные приспособления: Справочник. В 2-х т. Т. 1 /под ред. Б. Н. Вардашкина, А. А. Шатилова. М., 1984. 592 с.
4. Пат. 125543 Україна, МПК В23Р 19/10. Пристрій для обтиснення бандажа кріплення / Коденець Д. О., Шевцова А. І., Швець В. І., Сенча С. А. № u2017 12806; заявл. 22.12.2017; опубл. 10.05.2018, Бюл. № 9.

Статья поступила 08.02.2019