

УДК 669.018: 629.7

**Перспективы применения сплавов с памятью на основе
никелида титана в устройствах аэрокосмического назначения**

М.О. Халов

Аннотация

Работа посвящена решению проблемы формирования спроса на мартенситную технику в аэрокосмической отрасли.

Ключевые слова: никелид титана; эффект памяти формы; аэрокосмическая отрасль

Введение

При создании никелидтитанового сплава памяти (НТСП) нитинол-55американские ученые Дж. Бюхлер и Р.К. Вилей руководствовались «необходимостью получения материала, сочетающего высокую прочность с небольшим весом для использования в условиях высоких температур в ракетной и космической технике» [1]. По этой причине такие уникальные свойства НТСП, как эффекты памяти формы (ЭПФ), обратимой памяти формы (ЭОПФ) и сверхупругости (ЭС) были впервые использованы при создании мартенситных устройств (МУ) военного назначения.

В шестидесятых годах прошлого века американские спутники уже оснащались самораскрывающимися антеннами с нитиноловыми приводами, а в самолетах F-14 несварная герметичная стыковка трубопроводов обеспечивалась муфтами из НТСП, объем производства которых, в 1969 году измерялся сотнями тысяч штук [2].

В 1979 году на космическом корабле «Прогресс-40» был проведен эксперимент «Краб» по разворачиванию двух кольцевых антенн диаметром 20м. В 1991 году на космической станции «Мир» с использованием муфт из НТСП была собрана ферма «Софора» (рис.1а) [3,4].

Годом позже на модуле «Квант» станции «Мир» путем прямого пропускания тока через проволочный привод из НТСП диаметром 2мм была развернута ферма «Рапана» [3,4].

Основным поставщиком полуфабрикатов из НТСП в СССР являлся Всесоюзный институт легких сплавов (ВИЛС), где в семидесятых-восемидесятых годах прошлого века под руководством Л.П. Фаткуллиной была разработана технология производства слитков из НТСП

массой до 500кг. Как показали дальнейшие события, свертывание данного производства сыграло ключевую роль в нынешнем снижении интереса производителей к МУ. Поскольку, если прежде предприятия и НИИ могли заказать полуфабрикаты из НТСП и получить их из ВИЛСа даже в порядке оказания научно-технической помощи, то сейчас при рыночной цене в 15-17 тысяч рублей стало выгоднее приобретать полуфабрикаты из НТСП более высокого качества из-за рубежа.

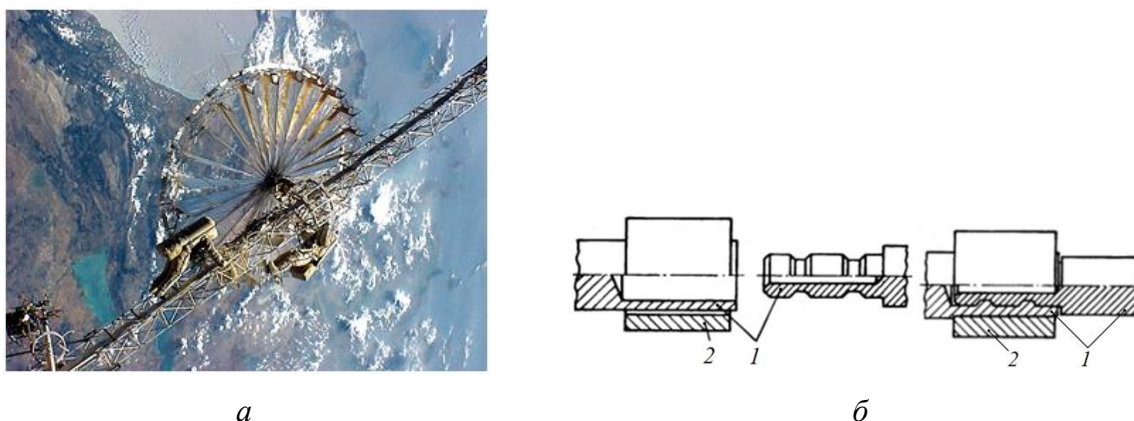


Рис.1– Ферма длиной 14,5м с квадратным сечением шириной 0,5м, собранной на станции «Мир» при проведении эксперимента «Софора» и конструкция использованных при этом муфтовых соединений [3,4]: *а* – ферма длиной 14,5м с квадратным сечением со стороной 0,5м; *б* – соединительная муфта из НТСП (ТН-1К) до и после соединения составных элементов фермы: 1 – составные элементы фермы в виде стержней диаметром 28мм из алюминиевого сплава; 2 – криогенная соединительная муфта из НТСП марки ТН-1К

Отсутствию спроса на мартенситную технику аэрокосмического и других назначений способствуют также изъяны в воспитании и подготовке кадров для работы с НТСП, из-за чего МУ остаются невостребованными теми, кто мог бы получить от их использования максимальную пользу, а разработкой конкурентоспособной мартенситной техники занимаются в основном энтузиасты узкого профиля. Главным образом материаловеды, которые в силу узкой специализации обычно делают крен в пользу решения возникающих технических проблем путем улучшения эксплуатационных характеристик используемых НТСП.

Предлагаемая работа посвящена формированию спроса на мартенситную технику аэрокосмического назначения среди специалистов данного профиля.

К наиболее известным из МУ аэрокосмического назначения можно отнести соединительные муфты из НТСП (рис.2), выпускаемые в России из НТСП марки ТН-1К в соответствии с ГОСТ^{ОМ} Р53462-2009

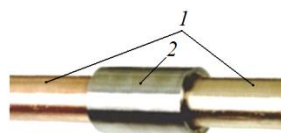


Рис. 2 – Соединение стальных труб муфтой из сплава с ЭПФ: 1 - стальные трубы; 2 - соединительная муфта из сплава ТН-1К

Представленная муфта послужила прототипом при разработке предлагаемой нами сборной соединительной мартенситной муфты, отличающейся тем, что ее корпус может быть изготовлен не только из НТСП, но и из других сплавов, а рабочий элемент памяти (РЭП) имеет вид предварительно растянутой в мартенситном состоянии тонкой проволоки или ленты из НТСП (рис.3)

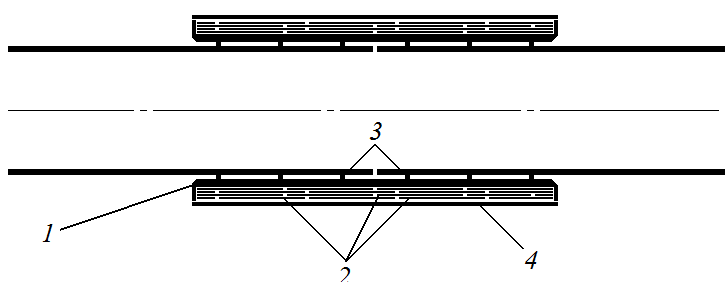


Рис.3 - Сборная соединительная муфта с ЭПФ. 1 - соединительный трубчатый корпус (катушка); 2 – лентовидный РЭП из содержащего ниобий никелида титана; 3 – стыкуемые трубы; 4 – защитный пластиковый кожух

После установки муфты на трубопроводном стыке, ее нагревают. По мере нагрева РЭП 2 переходит в аустенитное состояние, укорачивается, и обжимая корпус 1, уменьшает его диаметр, что обеспечивает герметичное соединение муфтой стыкуемые трубы 3. Пластиковый кожух 4 обеспечивает защиту от механических повреждений тонких никелидтитановых лент муфты.

По эффективности энергопреобразования толстостенные никелидтитановые заготовки значительно уступают тонким проволокам и лентам, что обеспечивает снижение расхода дорогостоящих сплавов с ЭПФ.

При изготовлении корпуса не из НТСП достигается значительное упрощение технологии обработки НПС, сокращение отходов дорогостоящих НТСП и расширение номенклатуры выпускаемых изделий. Это позволяет выпускать сборные муфты, внутренним диаметром менее 6мм и более 150мм, обеспечивая создание и поддержание задаваемого обжимающего воздействия на стыкуемые трубы путем изменения количества слоев обматывающих корпус никелидтитановых проволок или лент.

Важную роль в повышении надежности летательных аппаратов могут сыграть предлагаемые ниже аварийные МУ, ускорению темпов внедрению которых способствует то, что поскольку их

РЭП рассчитаны на одно или несколько срабатываний для их изготовления могут быть использованы легкодоступные и наименее дорогие полуфабрикаты из НТСП.

Снижению массы и повышению надежности летательных аппаратов отвечает замена используемых в аварийных ситуациях вспомогательных гидронасосов или баллонов со сжатым газом, мартенситными шприцевальными устройствами (рис.4)

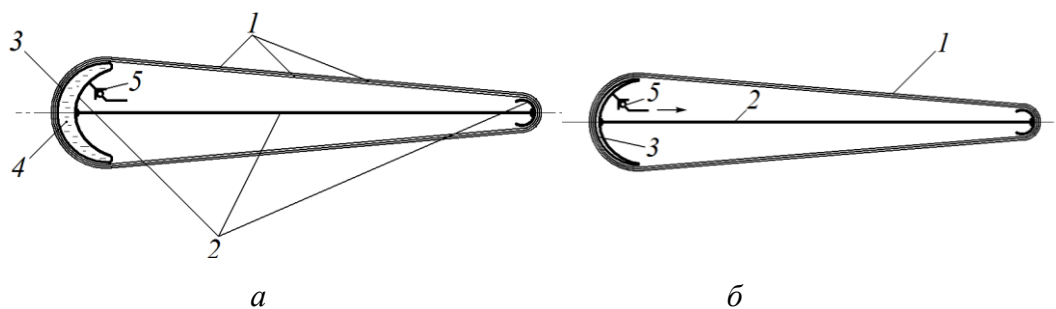


Рис. 4 - Шприцевальное устройство с ЭПФ: 1 – лентовидный РЭП из НТСП; 2 – жесткий корпус; 3 – труба из пластичного металла; 4 – гидравлическая жидкость; 5 – обратный клапан

Нагрев, предварительно растянутых лентовидных РЭП 1, вызывает сжатие опирающейся на жесткий корпус 2 пластичной трубы 3, в результате чего гидравлическая жидкость 4 из нее через обратный клапан 5 выдавливается под давлением к потребителю.

Применению мартенситного шприцевального устройства в летательных аппаратах благоприятствует то, что жестким корпусом шприцевальной установкой с ЭПФ могут служить как трубчатые, так и плоские силовые элементы самолетов, и что рабочее давление создается в пластичной трубе путем нагрева РЭП непосредственно во время его срабатывания. Благодаря чему на протяжении всего срока бездействия в законсервированном состоянии оно не нуждается освидетельствовании на герметичность.

Повышению надежности летательных аппаратов отвечает использование в них аварийных дублеров, которые отличаются от дублируемых объектов принципом действия. В этом плане мартенситные дублеры могут повысить эффективность аварийных систем.

Для дублирования гидроприводов стоек шасси, щитков или подкрылков подверженных повышенной угрозе повреждения летательных аппаратов можно воспользоваться мартенситным приводом, схема которого представлена на рис.5 [5]

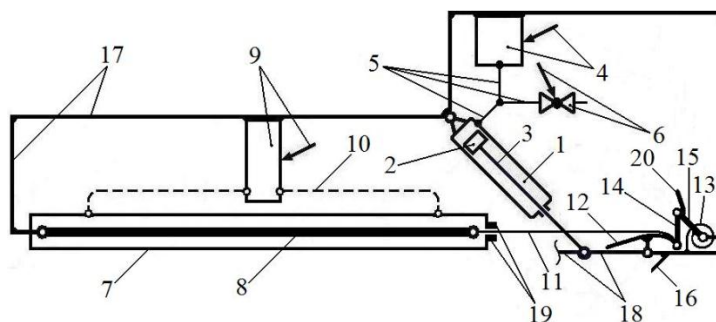


Рис.5– Мартенситный привод летательного аппарата с рычажно-лекальным средством эффективного нагружения [5]: *а* – привод с ЭПФ в законсервированном состоянии; *б* – привод с ЭПФ в мартенситном состоянии. Цилиндр – 1; поршень – 2; шток – 3; насос – 4; трубчатая линия управления – 5; клапан – 6; трубчатый кожух – 7; РЭП – 8; источник горячего газа 9; газопровод – 10; трос – 11; лекальный рычаг – 12; пружина – 13; рычаг – 14; рычаг – 15; упор – 16; корпус летательного аппарата – 17; рычаг регулируемого элемента летательного аппарата – 18; уплотнительная втулка – 19; упор – 20.

При штатном режиме работы устройства клапан 6 закрыт и поворот рычага 18 производится поршнем 2 под действием нагнетаемой насосом 4 в цилиндр 1 жидкости или газа. При этом перемещаемый штоком 3 рычаг 18 не оказывает силового воздействия на рычаг 12.

В случае отказа насоса 4, разгерметизации линии 5 или повреждения цилиндра 1 и поршня 2 одновременно открывают клапан 6 и включают источник 9. В результате полость цилиндра 1 сообщается с окружающей средой, а через кожух 7 начинает циркулировать подогреваемый источником 9 горячий газ.

В результате нагрева горячим газом, находившиеся до этого в охлажденном мартенситном состоянии предварительно растянутый элемент 8 испытывает аустенитное превращение и, укорачиваясь, совершает работу по повороту рычага 12, соединенных с ним рычагов 18, 14, 15 и деформации пружины 13. Причем благодаря особой форме рычага 12, при которой в процессе аустенитного превращения в элементе 8 оказываемое ему силовое противодействие со стороны рычага 18 убывает, данное превращение реализуется примерно при постоянной температуре, то есть в условиях достижения элементом 8 максимальной эффективности энергопреобразования, а значит, минимальной массы и тепловой инертности его действия.

Перед завершением данного рабочего хода элемента 8 пружина 13 перемещает рычаг 15 против часовой стрелки и в результате воздействия упора 20 на рычаг 14 происходит

заклинивание рычага 12 рычагами 14,15 и упором 20. После этого, по меньшей мере, только источник 9 выключают.

Сведения об авиационных гидроприводах [6] и ориентировочные данные о параметрах их мышцевидных мартенситных дублеров приведены в таблице

Таблица

Основные характеристики гидравлических приводов шасси самолетов ИЛ-76 и Ил-86 и их мартенситных дублеров

Тип самолета	Ил-76		Ил-86	
	Передняя опора	Главная опора	Передняя опора	Створка передней опоры
Используемые сейчас гидроприводы [6]				
Усилие, кН	40,5	146	234	26
Работа за ход, кДж	19,44	55,48	88,92	8,32
Масса гидропривода, кг	6,5	16	13,5	2,6
МУ. Полуфабрикат - поликристаллическая проволока из никелида титана диаметром 0,5мм. Удельная работа РЭП с лекальным рычагом – 3,7 кДж/кг				
Длина деформируемой (7%) части РЭП, м	6,86	5,43	5,43	4,57
Площадь сечения РЭП, см ²	1,16	4,17	6,69	0,74
Масса никелида титана в РЭП, кг	5,32	15,29	24,93	2,28
МУ. Полуфабрикат - быстрозакаленная лента из никелида титана шириной 20мм, толщиной 40мкм. Удельная работа РЭП с лекальным рычагом – 5,3 кДж/кг				
Длина деформируемой (7%) части РЭП, м	6,86	5,43	5,43	4,57
Площадь сечения РЭП, см ²	0,81	2,92	4,68	0,52
Масса никелида титана в РЭП, кг	3,74	10,77	17,68	1,60

Неоспоримым преимуществом аварийных мартенситных приводов перед традиционными дублирующими гидро- и пневмосистемами при создании космических аппаратов, инопланетных станций и авиационной техники является то, что РЭП представляют собой твердотельные прямые преобразователи тепловой или электрической энергии в механическую, в связи с чем они не нуждаются в дополнительных преобразователях видов энергии типа электрических насосов и компрессоров и в отличие от рабочих тел газовых и паровых машин не нуждаются в герметизации.

Особый интерес вызывает также применение аварийных устройств с ЭПФ там, где в аэрокосмической технике заказан путь громоздким мотор-редукторам, гидро- и пневмоприводам, например, в малогабаритных микроразмерных летательных аппаратах.

На рис. 6 показаны схемы спасательных МУ с РЭП в виде сверхупругих трансформеров из НТСП

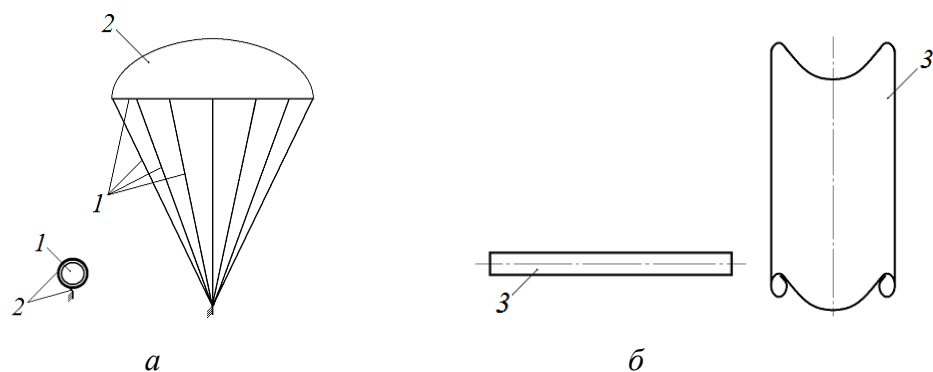


Рис.6 – МУ с РЭП в виде сверхупругих трансформеров из НТСП: *а* - парашют с мартенситным каркасом из НТСП в собранном и развернутом положении; *б* - сверхупругий аварийный трап из НТСП в собранном и развернутом положении.

1 – проволочным каркасом из НТСП; 2 – тканевый купол; 3 - сверхупругий жестяной трап из НТСП.

Ускорить раскрытие парашюта позволит его каркас 1 из никелидтитановых проволок, который при сложенном положении парашюта пластичен, а при пропускании через него электрического тока придает тканевому куполу 2 требуемую форму (*6а*).

Аварийный авиационный трап 3 имеет в вид листа из находящегося в сверхупругом состоянии никелида титана (*6б*). Во время полета летательного аппарата трап 3 свернут в плотный цилиндрический рулон, а на земле, по команде экипажа самопроизвольно разматывается, приобретая вид снабженного перилами жесткого желоба.

Негативные последствия от длительного пребывания космонавтов в открытом космосе могут уменьшить защищающие их от радиационного и механического воздействия самораскрывающиеся палатки с каркасами в виде электропроводов, жилы которых изготовлены из НТСП и на месте развертывания палатки нагреваются до аустенитного состояния путем пропускания через них электрического тока.

Указанные палатки могут входить в комплектацию скафандров или заранее размещаться в свернутом положении в тех местах космического аппарата, что нуждаются после вывода его на орбиту вобслуживании и особом контроле.

Повседневным атрибутом космонавта при выходе его в открытый космос, вероятно, станет, в будущем мартенситный линь-кабель, представляющий собой бухту покрытого изоляционной оболочкой двух- или многожильного электрического провода, жилы которого изготовлены из НТСП и соединены между собой на выпускном конце кабеля. На том же конце, можно установить вэб-камеру и электромагнитное или мартенситное захватное устройство.

При необходимости ремонта удаленных элементов космической станции, например, ее фотоэлектрических панелей, космонавт пропускает через никелидтитановый провод электрический ток, и линь принимает прямолинейную форму. После чего захватное устройство крепится в нужном месте ремонтируемого объекта и, используя многометровый линь-кабель, космонавт перебирается к месту ремонта. Аналогичным образом космонавты могут передавать друг другу различные приборы и инструменты, осуществлять переходы между космическими аппаратами и устанавливать протяженные электрические или воздушные коммуникации.

Дополнительный интерес к мартенситному линь-кабелю продиктован также возможностью использования его не по основному назначению, например, в качестве тепломеханического привода, при помощи которого, в условиях дефицита специальных инструментов можно аккуратно подтянуть к космической станции крупногабаритный груз, деформировать элементы станции при ее ремонте. Перемещать массивные грузы на планетах или катапультировать с заданным ускорением малогабаритные спутники.

При изготовлении трансформируемых корпусов непоршневых гидро- и пневмоприводов предлагается использовать сверхупругие сильфоны из никелида титана, технология изготовления которых отработана в процессе создания сильфонных компенсаторов теплового расширения нефте- и газопроводных магистралей [7] (рис.7).

Сильфонные патрубки 1 из НТСП постоянно находятся в сверхупругом состоянии. Для перемещения штока 1 в гидропривод через штуцер 2 подается под давлением гидравлическая жидкость. Увеличение объема сильфона 3 происходит за счет деформации его сверхупругих гофрированных стенок, что позволяет отказаться от применяемых в поршневых группах резиновых скользящих уплотнений. Герметичное соединение патрубка 1 с трубами 2 обеспечивается хомутами из предварительно растянутых в мартенситном состоянии проволок или лентам 3, которые в дальнейшем нагревают до аустенитного состояния.

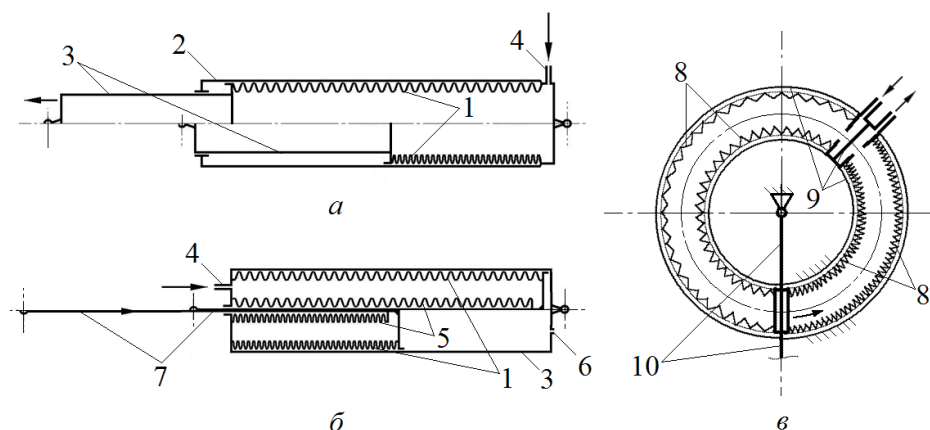


Рис.7 – Суперупругие сифонные аналоги гидравлического поршневого привода: *а*– привод, работающий на распор; *б* – привод, работающий на втягивание; *в* – реверсный привод, работающий на вращение. 1 – суперупругий сифон из НТСП; 2 - цилиндрический корпус; 3 - шток; 4 - штуцер; 5 - суперупругое сифонное уплотнение из НТСП; 6 – дренаж; 7 - тяга; 8 – свернутые в кольцо суперупругие сифоны из НТСП; 8 – корпус с разрезной торозадальной направляющей; 10 – рычаг.

К наиболее простым в изготовлении изделиям из НТСП можно отнести находящиеся в суперупругом состоянии конические шайбы из НТСП, обеспечивающие компенсацию термодформаций в подверженных значительным перепадам температур резьбовых соединениях летательных аппаратов.

Выводы

Результаты проделанной работы указывают на возможность ускорения темпов модернизации авиационной и космической техники за счет применения в ней мартенситных устройств с рабочими элементами памяти из НТСП.

Библиографический список

1. Buehler W.J., Wiley R.C. The Properties of TiNi and Associated Phases. Trans // ASM. - v.55. - №.2, June, - 1962.
2. Сплавы с эффектом памяти формы / Оцука К., Симидзу К., Судзуки Ю. и др.; Пер. с яп. И.И.Дружинина; Под ред. А.М. Глезера. –М.: Металлургия, –1990. – 224с.: ил.
3. Новое предприятие по разработке больших антенн для КА. Интернет-издание «Новости космонавтики» [novosti-kosmonavtiki.ru>content/number/229/...](http://novosti-kosmonavtiki.ru/content/number/229/) Москва. Декабрь 2001.
4. Пилотируемые полеты. Россия. Пресс-конференция в ЦУПе. Интернет-издание «Новости космонавтики» [novosti-kosmonavtiki.ru>content/number/056/01.Shtml](http://novosti-kosmonavtiki.ru/content/number/056/01.Shtml), Сентябрь 1993.

5.Матвеевко А.М., Фаткуллин О.Х., Халов М.О. Привод регулируемого элемента летательного аппарата: Заявка № 2011144456/12 на пат. (РФ), В64С13/32; В64С3/38; В64С3/50, 2011.

6.Системы оборудования летательных аппаратов: Учебник для С40 студентов высших технических учебных заведений / Акопов М.Г., Бекасов В.И., Долгушев В.Г. и др.; Под ред. Матвеевко А.М. и Бекасова В.И. – 3-е изд., исправл. И доп. – М.: Машиностроение, 2005. – 558 с.: ил. С.274

7.Чаевский М.И., Бледнова Ж.М., Будревич Д.Г. Способ соединения деталей, имеющих цилиндрическую поверхность сопряжения. Пат. №2001135004 (РФ), В23Р11/02, F16В4/00, 2003.

Сведения об авторе

Халов Мурад Османович, заведующий отделом НПО «Солнце»-Ашхабад-32, к.т.н., тел:8-919-72-77-900, e-mail:murad57@dk.ru