

05

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ СПЛАВОВ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ ПРИ СООРУЖЕНИИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ В ОТКРЫТОМ КОСМОСЕ

© Ю.Д.Кравченко,¹ В.А.Лузачев,² А.И.Разов,²
С.Н.Трусов,¹ А.Г.Чернявский¹

¹Ракетно-космическая корпорация "Энергия" им. акад. С.А.Королева, 141070 Калининград, Московская область, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, Научно-исследовательский институт математики и механики им. акад. В.И.Смирнова, 198904 Санкт-Петербург, Россия
(Поступило в Редакцию 8 февраля 1996 г.)

Сообщается о серии натуральных космических экспериментов по созданию крупногабаритных ферменных конструкций, сооружаемых с применением материалов, обладающих эффектом памяти формы. Показано, что никелид титана может быть эффективно использован в качестве рабочего тела приводов для трансформируемых конструкций и в качестве материала для термомеханических соединений элементов конструкций в открытом космосе. Сделан вывод о перспективности использования сплавов с памятью формы для решения задач, встречающихся при освоении космоса.

Введение

Освоение космического пространства в ближайшее время и в перспективе будет связано с созданием на околоземных орбитах крупногабаритных конструкций с размерами от нескольких десятков до тысяч метров. Сейчас уже начато проектирование международной научно-энергетической станции "Альфа" с очень большими массой и габаритами. Реализация подобных проектов требует создания и освоения новых технологий и новых методов сооружения на орбите больших конструкций, которые нельзя отправлять с космос пеликом. Отдельные фрагменты конструкций целесообразно при этом доставлять в сложенном виде, трансформируя их затем в необходимую форму и соединяя между собой. Из сказанного проистекают две важные проблемы в космическом строительстве крупногабаритных конструкций: проблема трансформации фрагментов конструкций в рабочее состояние и проблема скрепления этих фрагментов между собой. Анализ

существующих технических средств решения этих задач показывает, что достижение цели традиционными методами требует значительных материальных временных и инженерно-технических затрат и, следовательно, необходим поиск новых нетрадиционных решений.

Если говорить о самосооружающихся крупногабаритных фермах, то здесь, в частности, необходимо учитывать, во-первых, наличие требуемых приводов для трансформирования и, во-вторых, возникновение опасных динамических перегрузок. Управляемое раскрытие конструкции возможно с помощью электродвигателей, а частично управляемое — упругими аккумуляторами энергии, например пружинами. В первом случае возникают проблемы обеспечения надежности электродвигателей в широком интервале температур и в вакууме и проблема, связанная с существенным увеличением массы и усложнением конструкции. При использовании пружинных приводов существенным обстоятельством является наличие динамических перегрузок. Если говорить о проблеме соединения элементов конструкций в открытом космосе, то она также весьма серьезна. В условиях глубокого вакуума и невесомости затруднены процессы сварки, расклепывания, сборки с помощью резьбовых соединений и другие приемы, не вызывающие затруднений на Земле. В настоящей работе сообщается об успешном применении сплавов с эффектом памяти формы в задачах сооружения крупногабаритных космических объектов. Если говорить более конкретно, то в рамках настоящей работы приводятся данные об использовании сплавов с эффектом памяти формы в качестве рабочего тела приводов для развертывания в открытом космосе крупногабаритных конструкций и в качестве специального инструмента для соединения там элементов сооружаемых ферм между собой. При этом были решены две главные задачи: возможность автоматического сооружения конструкций и возможность поэлементной ручной сборки космонавтами. Во всех приводимых ниже примерах непосредственной реализации этой программы в космическом пространстве ей предшествовали масштабные эксперименты в лабораторных условиях, а также в условиях, имитирующих особенности работы на борту корабля и в открытом космосе. В частности, применяли обезвешивание, использовали совершающий высотные маневры самолет, водную среду для тренировок экипажей и т. д. Для решения поставленных задач были выбраны специальные композиции на основе никелида титана, которые обладали требуемыми температурным интервалом мартенситных превращений, степенью обратимости деформации, механическими и физическими свойствами, надежностью, т. е. показателями качества. Рассмотрим теперь результаты работы более подробно.

Эксперимент “Краб”

Эксперимент “Краб” включал в себя несколько задач: проверку возможности развертывания и формообразования крупногабаритных трансформируемых конструкций с помощью приводов из материала с эффектом памяти формы, исследование динамических характеристик двух развернутых конструкций (имеющих вид кольцевых каркасов) при маневрировании космического аппарата и проверку соответствия расчетных характеристик экспериментальным. Эти каркасы в сложном виде были установлены на внешней поверхности грузового корабля “Прогресс-40” на отсеке компонентов дозaprавки. Каждый каркас

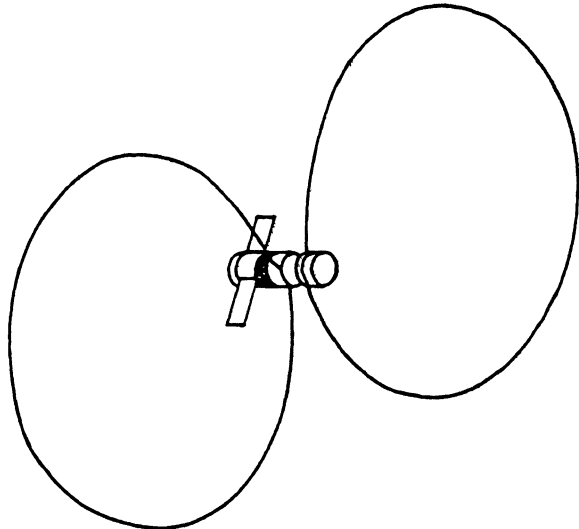


Рис. 1. Конструкция “Краб”.

состоял из отдельных элементов, шарнирно соединенных между собой. В развернутом виде он представлял собой правильный многоугольник со вписанной окружностью диаметром 20 м. Для разворачивания каркаса из транспортного состояния в рабочее использовали 78 приводов из проволоки диаметром 2 мм (сплав TiNi с эффектом памяти формы), которая при нагревании электротоком создавала момент сил в шарнирном соединении. Масса одной конструкции составляла около 65 кг, а трансформируемого каркаса — 58 кг.

Весь эксперимент был проведен с 3 по 5 марта 1989 г. и его выполняли по командам с Земли следующим образом. После отхода грузового корабля “Прогресс-40” от орбитальной станции “Мир” на расстояние 70–80 м была подана команда на отстрел крышки первого контейнера. Его разворачивание проходило в течение 5 мин, а формообразование еще около 10 мин. Такие же работы были проделаны и со вторым каркасом. В последующие двое суток исследовали поведение каркасов при маневрировании грузового корабля “Прогресс-40”. Например, было установлено, что период собственных колебаний каркаса составил 190 с, что подтвердило правильность предварительного моделирования. Центр управления полетами следил за ходом экспериментов с помощью телекамеры, установленной на грузовом корабле, получал телеметрическую информацию. Экипаж станции “Мир” в составе А. Волкова, С. Крикалева и В. Полякова производил видео- и фотосъемку. Общий вид грузового корабля с развернутыми каркасами схематически показан на рис. 1. Успешное завершение этого космического эксперимента убедило в том, что приводы из материалов с эффектом памяти формы надежно работают в условиях открытого космоса, отличаются простотой исполнения и исключительно малыми массой и габаритами. Они допускают простое дистанционное управление и по перечисленным характеристикам превосходят другие типы приводов.

Эксперимент "Софора"

Эксперимент "Софора" представил собой результат разработки технологии сборки ферменных конструкций в открытом космосе с помощью термомеханических соединений, в которых основную роль играет материал с эффектом памяти формы. Эта технология позволяет собирать крупногабаритные ферменные конструкции как в ручную, так и с помощью автономных манипуляторов. В самом эксперименте "Софора" осуществляли ручную сборку 14,5-метровой ферменной конструкции. Ферма имела в поперечнике размеры $0,5 \times 0,5$ м и массу 90 кг. Она состояла из стандартных узлов: квадратных диафрагм и продольно-диагональных У-образных элементов, которые в транспортном состоянии были сложены, а во время сборки их раскрывали. Представление о конструкции фермы дает рис. 2, на котором отдельно показаны диафрагма 1 с четырьмя отверстиями и У-образные элементы 2, содержащие стержень 3, фитинг 4, муфту из материала с эффектом памяти формы 5 и шарнир 6. Процесс сборки фермы заключался

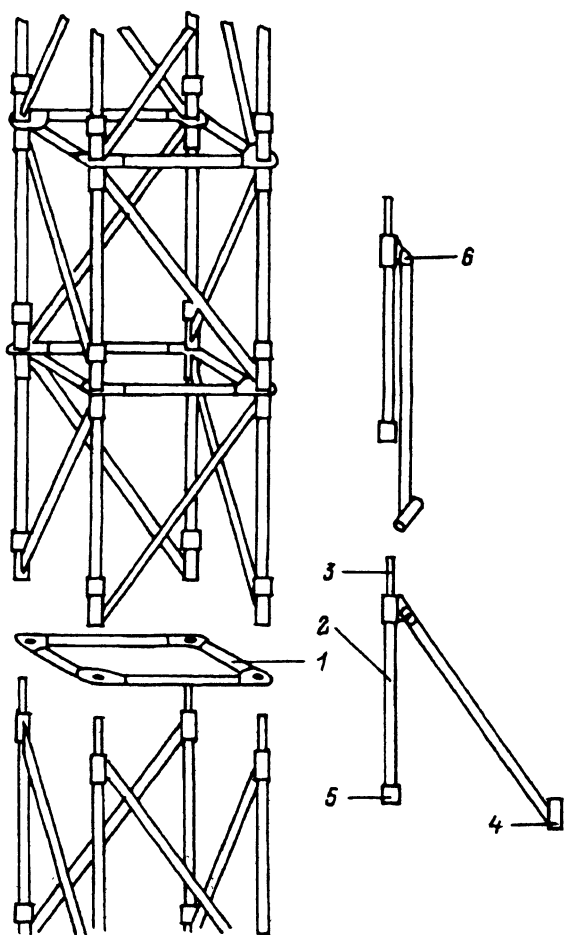


Рис. 2. Ферма "Софора".

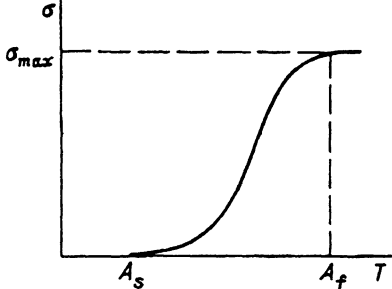


Рис. 3.

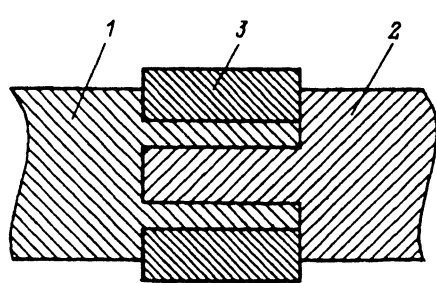


Рис. 4.

в фиксации стержней У-образных элементов одного пояса, проходящих сквозь отверстия диафрагмы, в фитингах У-образных элементов следующего пояса и последующем обжатии соединения муфтой 5. Обжатие осуществляли путем нагрева муфты 5 кварцевыми лампами до требуемой температуры. Такое соединение элементов принято называть "термомеханическое". Простейшее термомеханическое соединение обычно имеет в своем составе три элемента: две законцовки скрепляемых деталей и муфту из материала с эффектом памяти формы. Муфту сначала увеличивают в диаметре путем дорнования при температуре ниже температуры M_f окончания прямого мартенситного превращения, затем свободно надевают на законцовки и производят нагрев муфты выше температуры A_f окончания обратного мартенситного превращения. В результате эффекта формовосстановления муфта обжимает соединяемые элементы, обеспечивая их скрепление с расчетным усилием. Кинетика развития реактивных напряжений в таком соединении в зависимости от температуры показана на рис. 3.

Однако использование такой схемы термомеханического соединения в разрабатываемой технологии сборки оказалось невозможным по нескольким причинам. Во-первых, условия открытого космоса требовали чтобы температура A_s начала обратного превращения была больше 360 К, а температура M_s начала прямого превращения была меньше 170 К. Во-вторых, условия работы в открытом космосе практически исключали процесс дорнования непосредственно перед сборкой и использование при этом криогенной техники и требовали проведения всех операций на Земле, оставляя лишь фиксацию элементов и нагрев муфт на орбитальный этап сборочных работ.

По этим причинам было принято решение применять муфту из никелида титана только как обжимной инструмент. Схема разработанного соединения представлена на рис. 4. Здесь одна из деталей 1 имеет хвостовик трубчатой формы, а другая 2 — цилиндрический стержень, входящий внутрь хвостовика. Муфта 3 при нагреве опрессовывает такую сборку до нужного уровня прочности, после чего ее служебные функции прекращаются. Ясно, что при подобном подходе к сплаву TiNi предъявляется лишь требование, чтобы температура A_s была больше 360 К. Работоспособность узла не имеет ограничений по нижней температуре эксплуатации. Верхняя температура не должна превышать температуру потери несущей способности материала соединяемых деталей. В описываемой здесь конструкции применяли алюминиевые сплавы, что ограничивало верхнюю температуру эксплуатации значением около 470 К, когда начинается снижение прочности свойств.

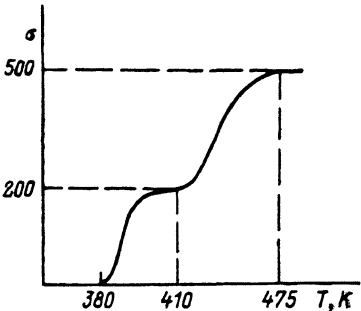


Рис. 5.

вероятные исключения из этого правила. Чтобы свести на нет любую вероятность отказа в соединении, были выбраны такие размеры сопрягаемых деталей на рис. 4, что кинетика нарастания реактивных напряжений в муфте соответствовала диаграмме на рис. 5. Соединение оказывалось полностью опрессованным к моменту исчерпания "площадки" на рис. 5. После этого реактивные напряжения продолжали расти до значения приблизительно 500 МПа и в принципе была не исключена вероятность разрыва муфт, однако это уже не имело бы значения, так как сборка соединения завершилась при напряжениях всего около 200 МПа, при которых разрушение муфты исключено вне каких-либо сомнений (при дорновании муфта выдерживала напряжение около 600 МПа). Впрочем, примерно из тысячи собранных и испытанных соединений такого типа разрушение в процессе нагрева при достижении предельного уровня 600 МПа не наблюдалось ни разу.

Эксперимент "Софора" был реализован в июле 1991 г. на станции "Мир" космонавтами А. Арцебарским и С. Крикалевым. После доставки на орбиту всех грузов с помощью корабля "Прогресс-Т8" и подготовительных работ в модуле "Квант-2" все оборудование было вынесено на внешнюю поверхность астрофизического модуля "Квант". Так в течение 4 выходов в открытый космос примерно за 22 ч работы космонавты собрали ферму и установили ее в замках на поверхности модуля "Квант". При этом было собрано 84 термомеханических соединения путем обжатия каждого из них муфтой из никелида титана. Более подробно весь ход работы и технические детали его описаны в [1]. В сентябре 1992 г. на станцию "Мир" была доставлена выносная двигательная установка, которую уже другой космический экипаж в составе А. Соловьева и С. Авдеева укрепил на конце фермы. Этот двигатель в настоящее время используется для управления ориентацией станции по каналу крена. Масса выносной двигательной установки 750 кг, а масса всех грузов, доставленных на орбиту, включая ферму и оборудование для ее сборки, около 1000 кг. Общий вид космического комплекса "Мир" с установленной фермой и двигателем схематически показаны на рис. 6.

Эксперимент "Рапана"

Работы по созданию и исследованию приводов из материалов с эффектом памяти формы для трансформируемых космических конструкций были продолжены в эксперименте "Рапана". В рамках этой программы была сконструирована и изготовлена трансформируемая фер-

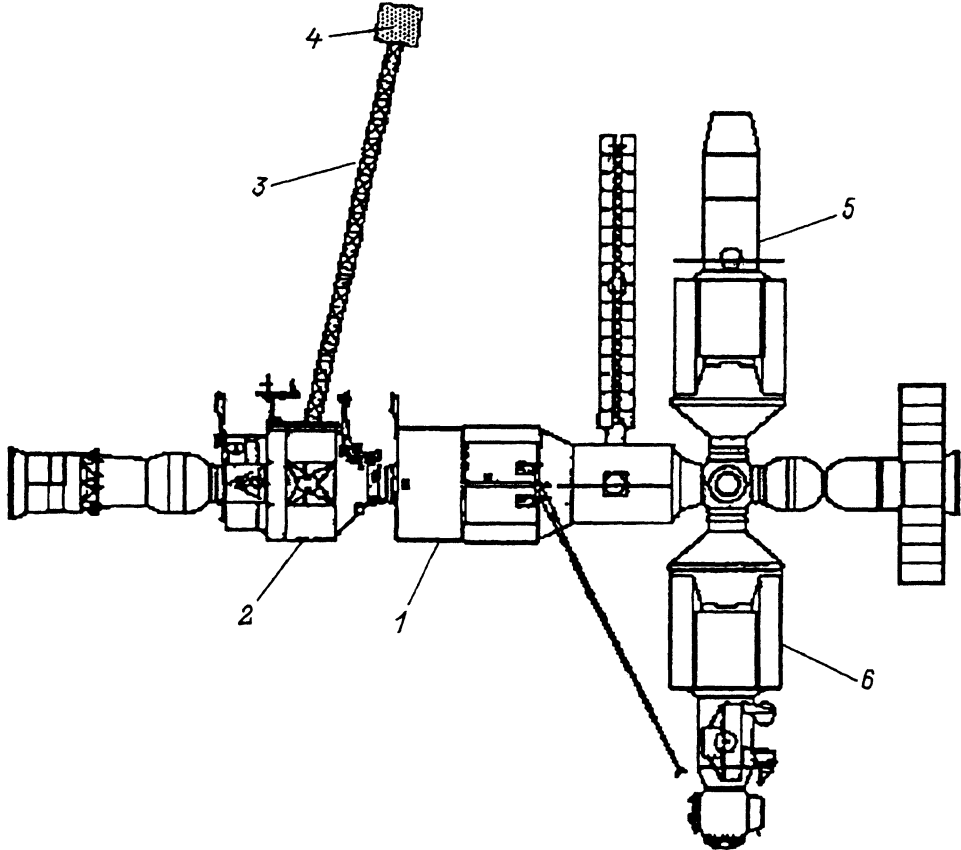


Рис. 6. Орбитальный комплекс "Мир".

1 — станция "Мир", 2 — модуль "Квант", 3 — ферма "Софора", 4 — выносная двигательная установка, 5 — модуль "Квант-2", 6 — модуль "Кристалл".

ма длиной 5 м с поперечным сечением 0.3×0.4 м и массой 13 кг. Она состояла из пяти ячеек, каждая из которых содержала 4 углепластиковые панели, шарнирно соединенные между собой. Диагональные элементы ячеек представляли собой "ломающиеся" звенья с проволочными приводами. Как и в конструкции "Краб", применяли двухмиллиметровую проволоку из никелида титана и электрический нагрев для приведения привода в действие. В отличие от привода "Краб", который имел два одинаковых шарнирно соединенных звена, привод фермы "Рапана" состоял из двух различных по длине шарнирно соединенных звеньев. Такое конструктивное отличие было продиктовано кинематикой раскрытия фермы. Характер изменения напряжений в рабочем элементе привода в зависимости от угла раскрытия показан на рис. 7. Большие значения напряжения в начале раскрытия обусловлены плотной компоновкой фермы в сложенном состоянии, а в конце раскрытия — наличием фиксаторов конечной конфигурации фермы. В ходе эксперимента "Рапана" экипаж станции "Мир" в составе В. Циблиева и А. Сереброва в сентябре 1993 г. во время первого выхода установил на поверхности модуля "Квант" рядом с фермой "Софора" на месте стального устройства для ее сборки сложенную ферму "Рапана". Во втором вы-

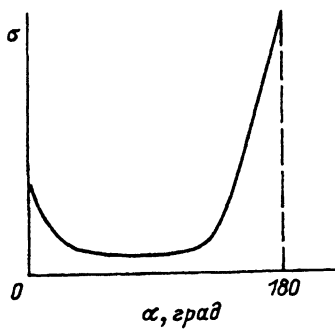


Рис. 7.

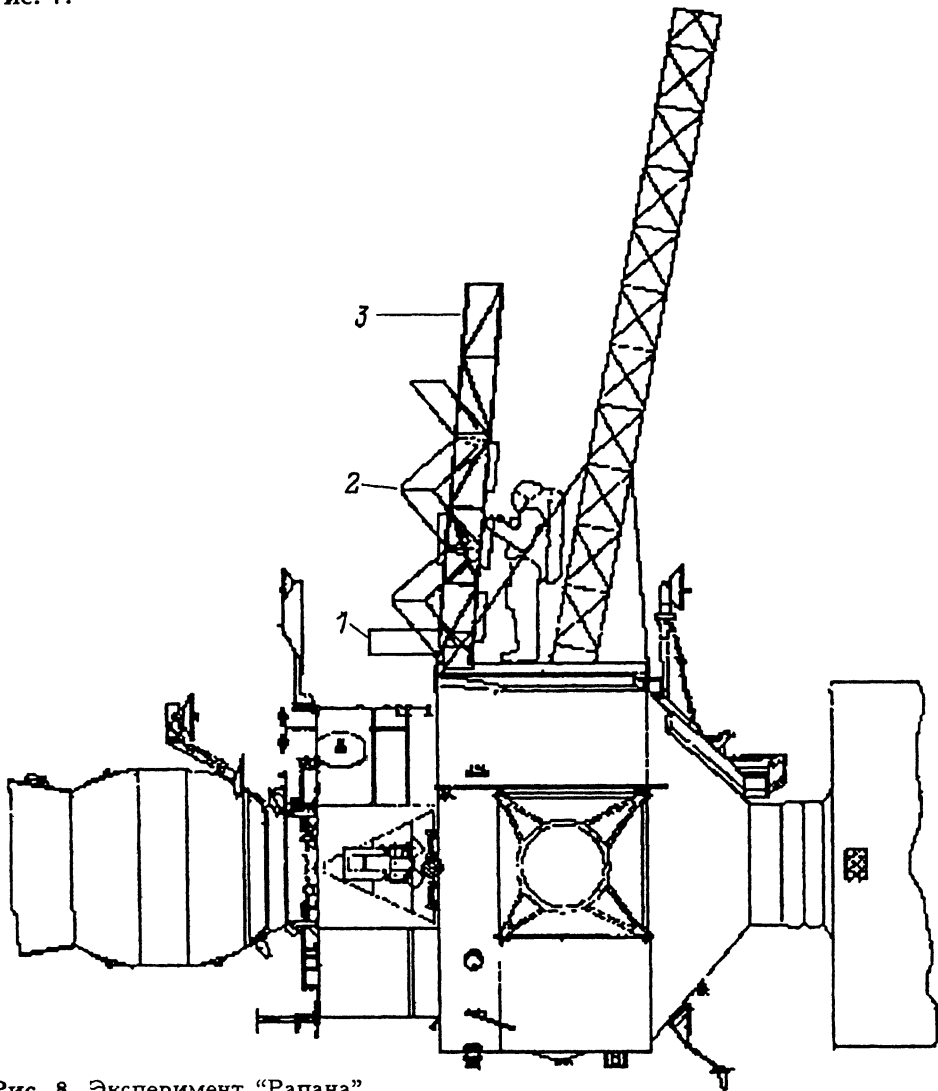


Рис. 8. Эксперимент "Рапана".

Ферма в транспортном (1), промежуточном (2) и финишном (3) положении.

ходе в открытый космос космонавты включили электропитание, в результате чего ферма трансформировалась в рабочее положение. Затем космонавты установили на ферме научное оборудование. Представление о расположении фермы "Рапана" относительно модуля "Квант" и "Софоры" дает рис. 8. На нем ферма показана в транспортном, промежуточном и финишном положениях. Схематично обозначены и три блока научного оборудования.

Заключение

Анализ всех данных по трем вышеприведенным экспериментам показал, что использование сплавов с эффектом памяти формы в космической технике для приводов и соединения различных деталей является очень эффективным средством решения многих проблем. Традиционные решения нерациональны, менее перспективны, более трудоемки и требуют не только больших материальных затрат, но и большего времени, а главное, не позволяют достичь столь же высоких технических требований и показателей надежности. Некоторые дополнительные сведения о вышеизложенных проблемах можно найти в наших более ранних сообщениях [1-7].

Список литературы

- [1] Арцебарский А.П., Банщиков А.Ю., Белоглазова Е.Т. и др. // Матер. XXVI Межреспубликанского семинара "Актуальные проблемы прочности". Новгород, 1992. С. 3-18.
- [2] Бунин Л.А., Лямин А.Е., Плотников А.Д. и др. // Там же. С. 254-255.
- [3] Черняевский А.Г., Борисенко В.Я., Бунин Л.А. и др. // Всесоюз. конф. по маргитенситным превращениям в твердом теле. Тез. докл. Киев, 1991. С. 250.
- [4] Черняевский А.Г., Гуцков Б.Е., Корнеев В.Ю. и др. // Материалы с эффектом памяти и их применение. Новгород; Л., 1989. С. 256-257.
- [5] Черняевский А.Г., Бондарь В.К., Васильев А.Б. и др. // Матер. междунар. конф. по крупногабаритным космическим конструкциям. Новгород, 1993. С. 53.
- [6] Кравченко Ю.Д., Капустин В.Л., Черняевский А.Г. и др. // Там же. С. 82.
- [7] Семенов Ю.П., Белоусов П.М., Благов В.Д. и др. // Там же. С. 83.