

СТАБИЛЬНОСТЬ ФУНКЦИОНАЛЬНО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СПЛАВОВ НА БАЗЕ Ti-Ni И Cu-Zn-Al

А.И.Разов

*Санкт-Петербургский государственный университет,
198904 РОССИЯ, Санкт-Петербург, Старый Петергоф, Библиотечная пл., д.2
E-mail: razov@smel.math.spbu.ru*

В работе представлены результаты более чем десятилетних экспериментальных исследований изменения функционально-механических свойств сплавов на базе Ti-Ni и Cu-Zn-Al. В качестве объектов исследования использовали муфты, термомеханические соединения и кольцевые образцы. Было обнаружено, что степень возврата деформации и реактивные напряжения никелида титана практически не изменяются во времени, а температура начала формоизменения за счет эффекта памяти формы при нагреве снижается на 10 К, причем основное снижение происходит в первые два года. Реактивные напряжения, развиваемые сплавом Cu-Zn-Al, в отличие от никелида титана, в течение 12-ти лет уменьшаются на 25-35%. Основное уменьшение напряжений происходит в первые несколько дней. Сделан вывод о возможности применения указанных материалов в долговременно действующих или хранящихся длительное время устройствах.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы применение сплавов с эффектом памяти формы (ЭПФ) в различных областях техники и медицины расширяется все возрастающими темпами. За прошедшее десятилетие число организаций, занимающихся прикладными разработками в этой области, возросло практически на порядок. Все большее количество студентов высших технических учебных заведений специализируется на исследовании и проектировании устройств, использующих сплавы с ЭПФ, а также на технологии производства и передела материалов с целью получения наилучших термомеханических характеристик и новых видов полуфабрикатов. В связи с этим, помимо необходимости обеспечения оптимальных функционально-механических свойств, все чаще и чаще возникает потребность прогнозирования и гарантирования этих свойств с течением времени. Эта потребность возникает не только при прогнозировании процессов, протекающих во время эксплуатации изделий, но и при их длительном хранении или транспортировке. Основные вопросы, которые можно выделить в рамках описанной проблемы, связаны с возможным изменением степени возврата предварительно заданной деформации, уровня реактивных напряжений в изделии и стабильности обратимой памяти формы (ОПФ). В том случае, если изменение функциональных свойств связано с известным и прогнозируемым изменением структурного состояния или фазового состава, обусловленного, например старением, то результат влияния времени предсказать достаточно просто. Можно с уверенностью констатировать тот факт, что здесь речь пойдет не об улучшении указанных свойств с течением времени, а об их деградации. В остальных случаях результат не столь очевиден и требует исследования изменений ко-

личественных характеристик, происходящих во времени. Результаты первых попыток ответить на поставленные вопросы и излагаются в данной работе.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние времени хранения изделий из материалов с ЭПФ в продеформированном состоянии на их способность возвращать деформацию за счет эффекта памяти формы исследовали на кольцевых образцах из сплава Ti-47ат.%Ni-3ат.%Cu с характеристическими температурами $M_f = 323$ К; $M_s = 343$ К; $A_s = 358$ К; $A_f = 378$ К. Термическая обработка колец с внутренним диаметром 22,5 мм и толщиной 3,75 мм состояла из отжига при 773 К в течение 1 часа и охлаждения с печью. После термообработки кольца раздавали дорнованием на 8,5 % полной деформации на внутренней поверхности кольца (остаточная деформация составляла 6,9 % и 4,8 % на внутренней и внешней поверхности соответственно) и хранили при комнатной температуре. По истечении времени с некоторой периодичностью осуществляли испытания – в специально сконструированной установке проводили нагревание кольца в свободном состоянии со скоростью 1 – 2 К/мин, измеряя наружный диаметр с точностью 0,01 мм и определяя внутренний диаметр при 473 К с точностью 0,05 мм после извлечения кольца из установки. При первом нагреве кольцо возвращало предварительную деформацию за счет эффекта памяти формы, а при дальнейших охлаждениях и нагреваниях изменение диаметра кольца происходило за счет обратимой памяти формы мартенситного типа, сформированной в мартенситном состоянии при дорновании.

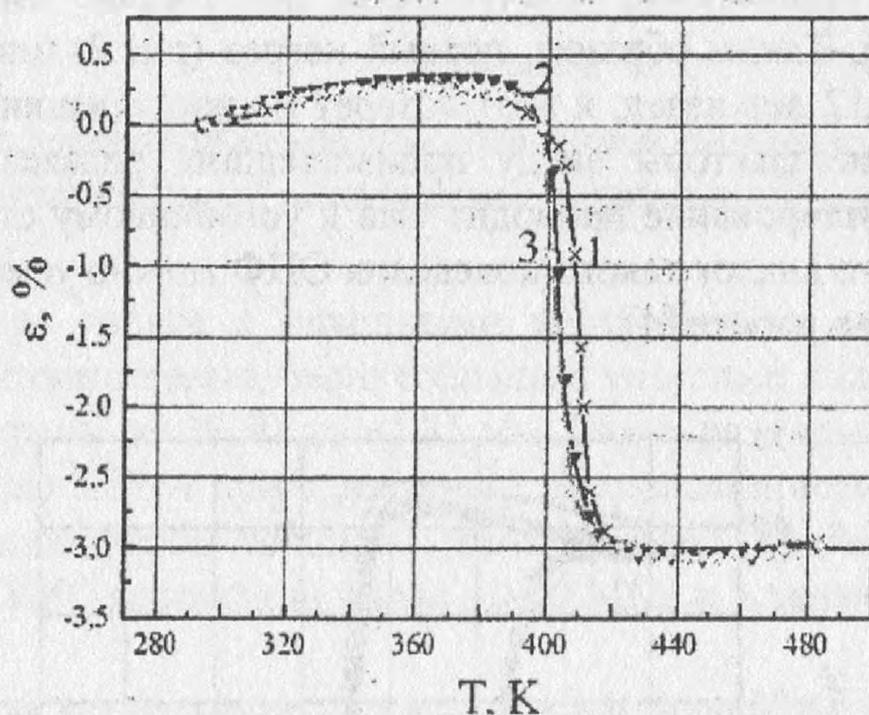


Рис.1. Зависимости деформации кольцевых образцов из сплава TiNiCu от температуры при нагревании в свободном состоянии сразу после дорнования (1), спустя 2 года (2) и 12 лет (3).

К настоящему времени срок хранения кольцевых образцов достиг двенадцати лет и последние опыты показали, что степень возврата деформации не изменяется и по-прежнему равна 0,77, а внутренний диаметр при 473 К составляет 22,85 мм. Изменения в температурных характеристиках возврата деформации произошли, в основном, в первые два года [1], а затем практически не изменились (рис.1). Так, температура начала интенсивного возврата деформации при нагревании (найдена методом касательных) сразу после раздачи составляла 405 К, после двух лет хранения она уменьшилась до 397 К, а спустя еще десять лет осталась практически на прежнем уровне — 396 К.

Между тем, следует заметить, что прекращение увеличения деформации за счет обычного температурного расширения начинается во всех случаях в районе 358 К. Наблюдаемое уменьшение температуры начала интенсивного возврата деформации, по-видимому, связано с релаксационными процессами, проходящими во времени. В пользу этого свидетельствует, во-первых, наблюдаемое с увеличением времени хранения уменьшение на 0,1-0,2 % величины обратимой памяти формы, измеренной сразу после реализации однократной памяти формы (при этом следует вспомнить, что главную роль в формировании ОПФ играют внутренние микронапряжения). Вторым аргументом в пользу высказанного предположения может служить и характер изменения обратимой памяти формы с течением времени. На рис.2 изображены зависимости деформации за счет ОПФ от температуры при последовательных нагревах и охлаждениях кольцевого образца, хранившегося после первого нагрева (и реализации тем самым в нем однократной памяти формы) в течение 12 лет в мартенситном состоянии со сформированной ОПФ. На рисунке явно видно отличие величины изменения деформации, обусловленной обратимой памятью формы, во время первого нагрева от изменения при последующих термоциклах. Для объяснения этого явления вспомним механизм формирования обратимой памяти формы. Она всегда формируется при охлаждении через интервал температур прямого превращения, во время которого внутренние напряжения или текстура, являясь ориентирующими факторами, создают преимущественные направления развития этого превращения. Вследствие этого происходит накопление деформации за счет эффекта пластичности прямого превращения. При последующем нагреве деформация возвращается, что внешне выглядит так, как будто это проявление однократной памяти формы, при этом происходит полное или частичное восстановление ориентирующих факторов. Именно вследствие такого механизма реактивные напряжения, развиваемые за счет ОПФ, значительно выше при нагреве, чем при охлаждении [2,3]. Таким образом, первый нагрев (рис.2) инициирует возврат деформации, заданной 12 лет назад, и этот возврат не восстанавливает имевшиеся в то время ориентирующие факторы ввиду произошедших релаксационных процессов. Дальнейшее термоциклирование приводит уже к устойчивому стабильному формоизменению. Заметим, что аналог такого поведения ОПФ можно усмотреть и в некоторых данных, приведенных в работе [4].

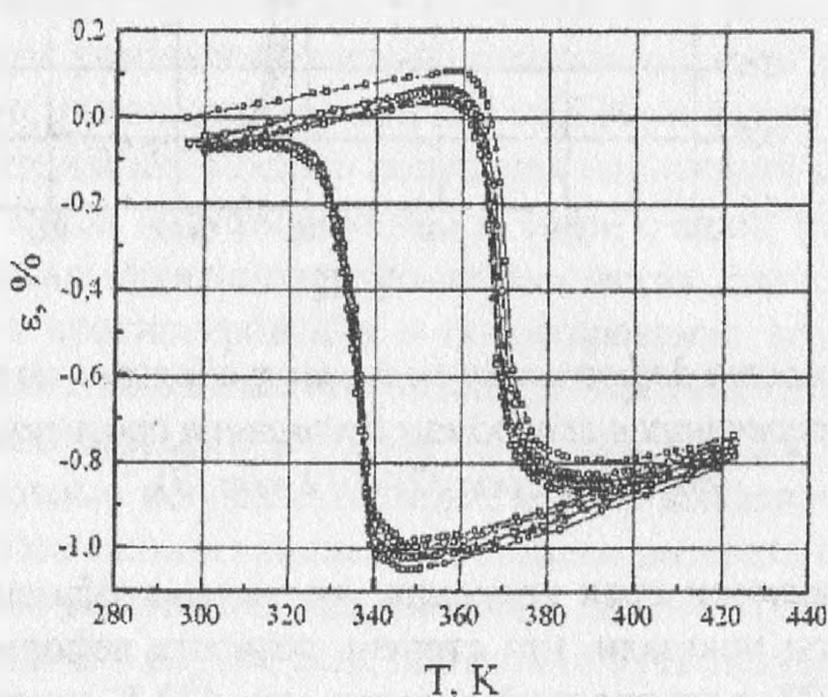


Рис.2. Зависимости деформации за счет ОПФ от температуры при термоциклировании кольцевого образца, хранившегося в течение 12 лет в мартенситном состоянии.

Следующее функциональное свойство – реактивные напряжения и их изменение во времени – исследовали двумя способами: рассчитывали напряжения непосредственно, измеряя внутренние диаметры упругих колец, собранных с кольцами из сплава с ЭПФ как обычные термомеханические соединения (ТМС), или оценивали косвенным путем по изменению силы, необходимой для страгивания муфты по сплошным оправкам в ТМС.

Реактивные напряжения, развиваемые сплавами на основе TiNi, практически не релаксируют во времени; ползучесть таких сплавов в аустенитном состоянии при умеренных напряжениях и комнатной температуре отсутствует. Даже в двухфазном состоянии никелид титана обладает пониженной релаксационной способностью (рис.3). Это подтверждается также нашими исследованиями, проведенными с использованием термомеханических соединений колец и муфт из сплава ТН-1К (сплав TiNiFe).

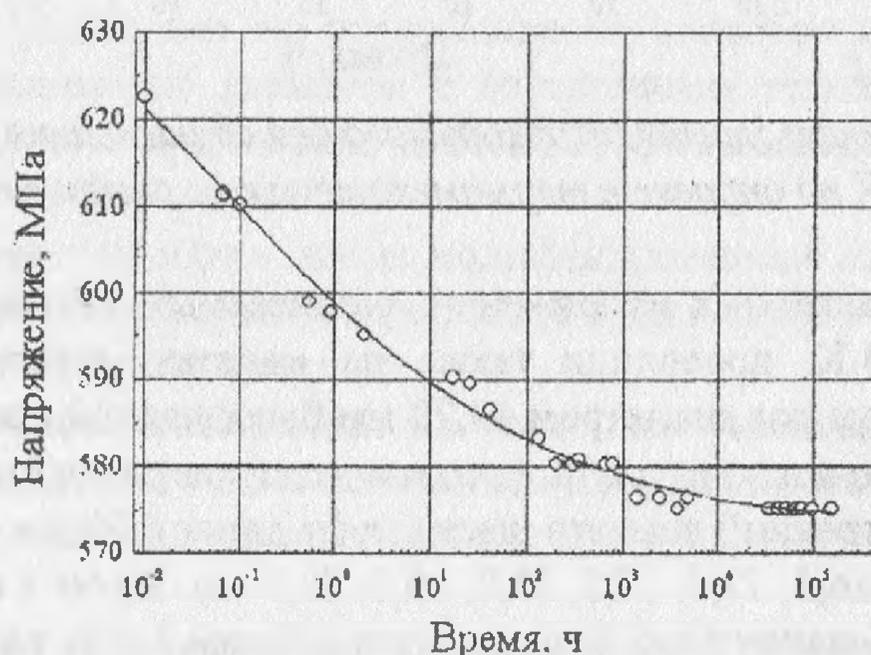


Рис.3. Релаксация напряжений при комнатной температуре в сплаве TiNi эквипроцентного состава, находящемся в двухфазном состоянии.

В первом случае кольца с исходными внутренним и наружным диаметрами 38,45 мм и 43 мм, соответственно, были собраны с упругими кольцами из сплава ВТ23 с наружными диаметрами от 39,50 до 41,85 мм. Такие размеры колец давали натяг в соединении от 2,8 % до 8,85 % при одинаковой жесткости противодействия, обеспечиваемой специальным подбором толщины упругих колец [5]. Радиальные реактивные напряжения в таких ТМС составляли около 50-70 МПа и в течение года их изменения не происходило.

Во втором случае аналогичные процессы наблюдались при исследовании изменения во времени усилия страгивания муфты из сплава ТН-1К по сплошным оправкам в устройстве, являвшемся термомеханическим соединением и служившем в качестве макета. Муфты с внутренним диаметром 19,2 мм, толщиной стенки 3 мм и различной длины надевали на сплошные стальные цилиндры с внешним диаметром 19,8 мм. Результаты измерения силы, необходимой для страгивания муфт различной длины по оправке приведены на рис.4. Наблюдающееся отсутствие уменьшения реактивных напряжений было также подтверждено и во время исследования негерметичности узлов ТМС электросоединителя [6]. В таких соединениях, использующих кольца из сплава той же марки ТН-1К, было обнаружено, что расход воздуха в них, если он есть, уменьшается во времени. Это особенно явно было видно в тех случаях, когда термоциклированием узла в диапазоне 213 К – 333 К создавали микронегерметичность (расход воздуха порядка 10⁻⁷ кг/ч), которая затем понижалась на порядок и более. Такое

уменьшение негерметичности является следствием того, что под действием реактивных напряжений, развиваемых сплавом ТН-1К, происходит релаксация напряжений в материалах соединяемых элементов, в основном за счет ползучести алюминиевого сплава, из которого изготовлен корпус. В результате соединение уплотняется.

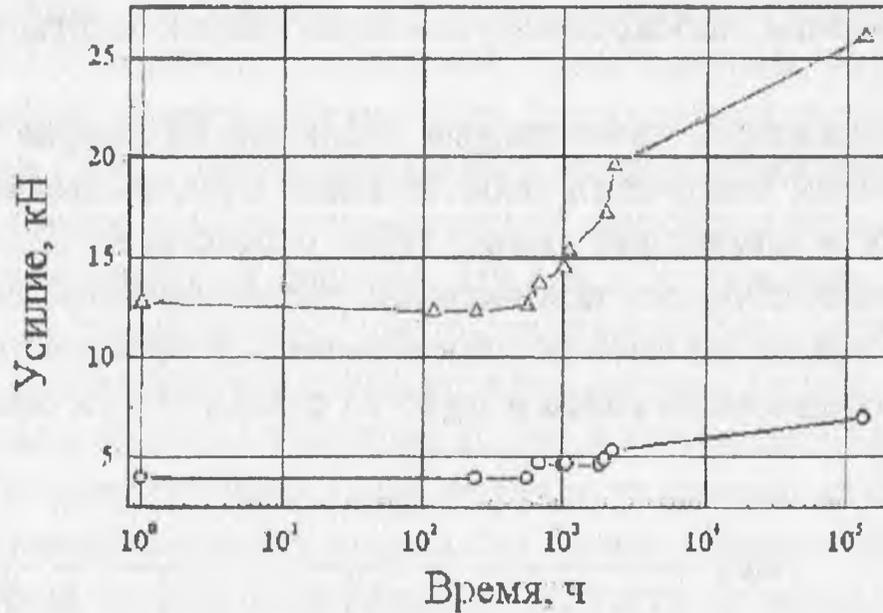


Рис.4. Зависимость усилия, необходимого для страгивания муфты из сплава ТН-1К по оправке в термомеханическом соединении.

Исследования реактивных напряжений, развиваемых литым сплавом CuZnAl с температурой $A_n = 143 \text{ K}$, проводили также на макетах, имитирующих ТМС. На сплошные стальные оправки диаметром 13,70 мм были надеты гладкие муфты, деформированные в среде жидкого азота, которые затем нагревали до комнатной температуры. Исходный внутренний диаметр шести муфт длиной 30 мм составлял 13,6 мм, а наружные диаметры – 16,5; 17,0; 17,5; 18,0; 19,0; 20,0 мм. Натяг в соединении был выбран порядка 0,6-0,8 % ввиду того, что при натяге более 1,5 % разрушение ТМС происходило непосредственно в процессе сборки, а при натяге около 1 % – спустя незначительное время после нее. О реактивных напряжениях судили по силе страгивания муфт по оправкам. Наиболее интенсивное снижение силы происходило на протяжении первых двух суток, причем, естественно, чем тоньше муфта, тем сильнее происходили релаксационные процессы. Так, например, усилие страгивания муфты № 1 упало с 7,7 кН до 4,9 кН; № 2 — с 9,9 кН до 7,6 кН; № 4 — с 9,4 кН до 7,9 кН; № 6 — с 12 кН до 11,7 кН. Затем, с течением времени, шла слабая релаксация и усилия страгивания у тех же муфт спустя пять лет равны соответственно 4,8, 6,4, 7,2 и 9,9 кН (рис.5).

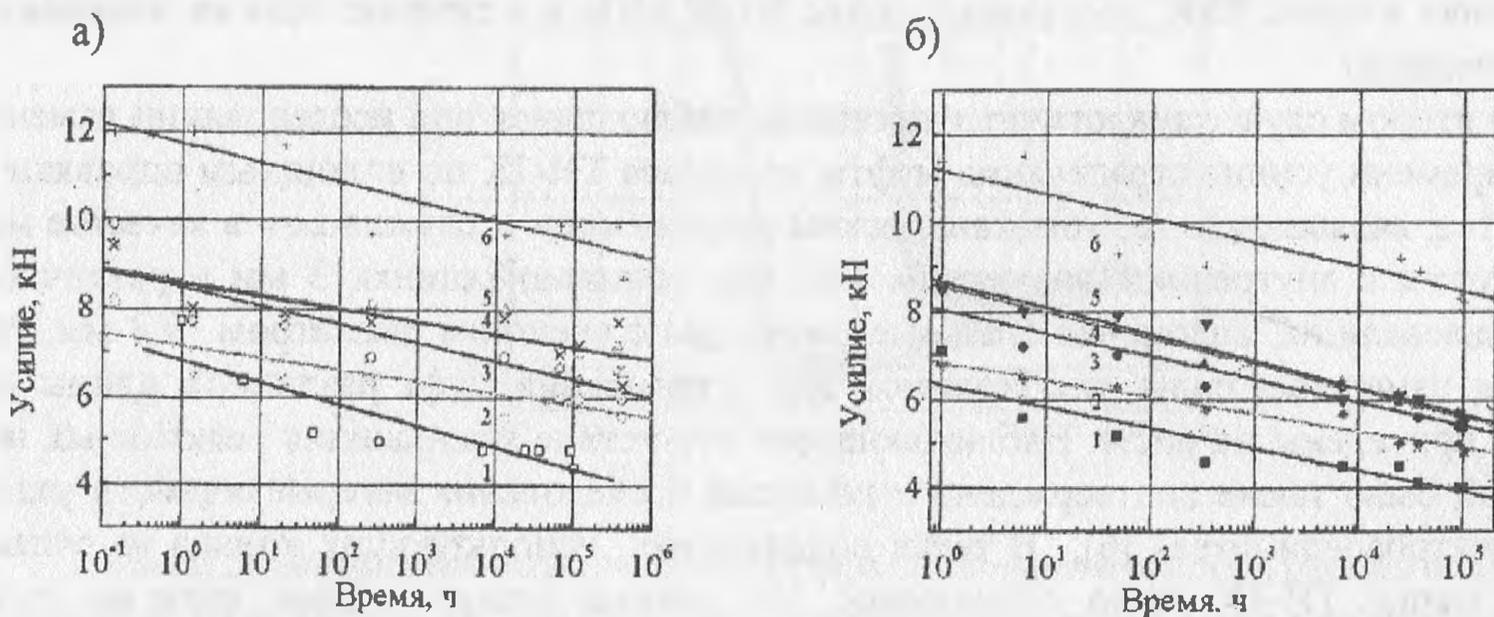


Рис.5. Зависимость усилия, необходимого для страгивания муфт из сплава CuZnAl с различными внешними диаметрами по оправкам в одном (а) и противоположном (б) направлении. 1-6 – номер муфты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Во всех долговременных испытаниях никелид титана проявил себя наилучшим образом. Степень возврата предварительно заданной деформации не уменьшается. Реактивные напряжения при комнатной температуре не релаксируют, если материал находится в аустенитном состоянии, и слабо релаксируют в двухфазном состоянии. Факт снижения температуры интенсивного возврата формы и величины обратимой памяти формы при хранении муфт в продеформированном состоянии легко может быть учтен при разработке конкретных устройств.

Исследованный сплав CuZnAl обладает более низкой релаксационной стойкостью, чем никелид титана, тем не менее, он также может быть использован в напряженных конструкциях. Учитывая, что натяг в соединениях не должен превышать 1 % (ввиду малой пластичности исследованного сплава в аустенитном состоянии), само термомеханическое соединение в данном случае можно рассматривать как обычную прессовую посадку муфты на вал, но отличающуюся, способом сборки. Муфту легко можно надеть на соединяемые элементы с достаточным технологическим зазором (3-4 %), который выбирается при нагреве за счет ЭПФ, а генерация реактивных напряжений осуществляется на базе менее 1 %.

В настоящее время появились новые модифицированные сплавы на медной основе с ЭПФ, в том числе и несколько более пластичные в аустенитном состоянии, что открывает перед ними новые перспективы.

Таким образом, изложенные данные по указанным термомеханическим характеристикам могут служить достаточным основанием для использования сплавов с ЭПФ в долговременно действующих или хранящихся длительное время устройствах.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 99-01-00987, 99-01-39123, 00-15-96023 и INTAS 97-1140.

Список литературы

1. Разов А.И., Тарасов А.В. Изменение во времени некоторых свойств сплавов с ЭПФ для термомеханических соединений // *Материалы с новыми функциональными свойствами / Материалы семинара. – Новгород – Боровичи, 1990. – С.111-114.*
2. Булдакова Т.А., Разов А.И. Никелид титана как рабочее тело мартенситного преобразователя энергии с антифазно-взаимодействующими элементами // *Рук. предст. редкол. журн. "Вестник ЛГУ", серия "мат., мех., астр.". Деп. в ВИНТИ 25.10.1988г., № 76516-B88.*
3. Беляев С.П., Кузьмин С.Л., Лихачев В.А., Щербакова Л.Н. Реактивные напряжения и эффект обратимой памяти формы в никелиде титана // *Физ. мет. и металловед. – 1991. – №1. – С.205-207.*
4. Хмелевская И.Ю., Лагунова М.И., Прокошкин С.Д., Капуткина Л.М. Исследование обратимого эффекта запоминания формы в термически и термомеханически обработанных сплавах на основе Ti-Ni // *Физ. мет. и металловед. – 1994. – Т.78, Вып.1. – С.83-88.*
5. Разов А.И., Тарасов А.В. Определение специальных свойств материалов с ЭПФ на кольцевых образцах // *Материалы с эффектом памяти формы и их применение / Материалы XXVI Межреспубл. семинара "Актуальные проблемы прочности". – Санкт-Петербург, 1992. – С.36-37.*
6. Бородина В.И., Бочков В.С., Злотников М.М., Разов А.И., Тарасов А.В. Влияние временных факторов на термомеханические соединения 17т32 // *Материалы с эффектом памяти формы и их применение / Материалы XXVI Межреспубл. семинара "Актуальные проблемы прочности". – Санкт-Петербург, 1992. – С.124-125.*