

УДК 539.3

ТЕНДЕНЦИИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СПЛАВОВ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ В ТЕХНИКЕ И МЕДИЦИНЕ

Войтышен В.С.^{1,2}, Коллеров М.Ю.³, Семенов В.Н.^{1,2}, Щербаков В.Н.^{1,2},
Фон Мьинт Тун² (респ. Мьянма)

¹ФГУП «Центральный аэрогидродинамический институт
им. проф. Н.Е. Жуковского», г. Жуковский, Россия

²ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт
(Государственный университет)», г. Долгопрудный, Россия

³ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (Национальный
исследовательский университет)», г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Сплавы с памятью формы (СПФ) состоят из двух или более компонент (аустенитная, мартенситная, ромбоэдрическая и т.д. фазы), обладающих существенно различными механическими свойствами (модуль Юнга аустенитной и мартенситной фаз в никелиде титана различаются в три раза). В отличие от обычных композитов, в СПФ компоненты могут переходить друг в друга при изменении температуры и (или) напряжений (термоупругие мартенситные фазовые превращения) или менять структуру некоторых из компонент под действием напряжений (структурный переход). В результате СПФ могут накапливать или возвращать деформации достаточно большой величины, т.е. управляемым способом менять свою форму. Поэтому СПФ можно причислить к классу адаптивных композитов. Благодаря происходящим в СПФ фазовым и структурным переходам, эти материалы обладают уникальными термомеханическими свойствами. Для них характерны такие явления, как накопление деформаций прямого превращения, монотонная, реверсивная и обратимая память формы, мартенситная неупругости и сверхупругость, ориентированное превращение, выделение и поглощение латентного тепла фазовых переходов, диссипативные явления.

В данной работе описан опыт использования этих свойств и явлений в одноходовых и циклически работающих актуаторах для авиационной промышленности, медицины, систем безопасности в нефтегазовой индустрии. Изложены перспективы и задачи создания адаптивных авиационных конструкций, биосовместимых имплантатов и протезов, тепловых аварийных заслонок.

Ключевые слова: сплав с памятью формы; актуатор; адаптивная конструкция; имплантат

TRENDS IN THE USE OF SHAPE MEMORY ALLOYS IN ENGINEERING AND MEDICINE

Voityshen V.S.^{1,2}, Kollerov M.Y.³, Semenov V.N.^{1,2}, Scherbakov V.N.^{1,2},
Phone Myint Tun² (Union of Myanmar)

¹Central Aerohydrodynamic Institute named Prof. N.E. Zhukovsky,
Dolgoprudniy, Russia

²Moscow Institute of Physics and Technology, Zhukovsky, Russia

³Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

ABSTRACT

Shape memory alloys (SMA) consist of two or more components (austenitic, martensitic, rhombohedral, etc. phases) with significantly different mechanical properties (Young's modulus of austenite and martensitic phases in titanium nickelide differ three-fold). Unlike conventional composites, in SMA the components can transform into each other with varying temperature and (or) stresses (thermoelastic martensitic phase transformations) or change the structure of some of the components under the action of stresses (structural transition). As a result, SMAs can accumulate or return deformations of a sufficiently large magnitude, i. e. managed way to change its shape. Therefore, SMA can be classified as a class of adaptive composites. Thanks to the phase and structural transitions occurring in the SMA, these materials have unique thermomechanical properties. They are characterized by such phenomena as the variability of elastic moduli in phase transitions, the accumulation of strains of direct transformation, monotonic, reversible and two way shape memory, martensitic inelasticity and superelasticity, oriented transformation, emanation and absorption of latent heat of phase transitions, dissipative phenomena.

In this article are described: the experience in the use of the unique properties of shape memory alloys in single and cyclic actuators for aviation, medicine and safety systems in the oil and gas industry; prospects and challenges for the creation of adaptive aircraft structures, biocompatible implants and prostheses, thermal emergency valves.

Keywords: shape memory alloy; actuator; adaptive structure; implant

ВВЕДЕНИЕ

Основные уникальные свойства сплавов с памятью формы (СПФ) это: собственно эффект памяти формы; высокая прочность; мощные силовые реакции, вызываемые нагревом; почти 3-кратное изменение модуля упругости при мартенситном преобразовании; возможность создания замкнутых циклов формоизменения и движителей на их основе [1-3], а также другие нетрадиционные в использовании свойства сплавов дают основу для построения уникальных конструкций и объектов с адаптивными, интеллектуальными и иными новыми свойствами. Выявление закономерностей поведения и новых функций материалов на наноуровне и использование неизвестных ранее закономерностей квантового и кластерного характера [4] открывают новые возможности для создания адаптивных конструкций и устройств.

Свойства СПФ позволяют создавать устройства, реализующие сложную кинематику деформационных перемещений элементов конструкций при максимальной весовой отдаче устройств, их конструктивной простоте и расположении в минимальном объеме. Энергетический КПД устройств на основе СПФ находится на уровне 4-6%, однако этот умеренный показатель компенсируется невысокими требованиями к теплоносителю и, обычно, его «попутным» производством, например, используются тепловые потоки от работающего двигателя. Достоинствами мартенситных приводов являются: бесщелевое изменение взаимного положения элементов и их формы, отсутствие кинематических звеньев, компактность устройств с выделением энергии устройств в минимальном объеме, как, например, у нитевидных кристаллов из сплава Cu-Al-Ni. Наноструктурирование сплава NiTi позволяет повысить уровень многоцикловых, полностью восстанавливаемых деформаций, от нынешних $\varepsilon=4\%$ до $\varepsilon=8-10\%$. Прочностные характеристики некоторых СПФ соизмеримы с характеристиками конструкционных сталей. Проблемой в технической реализации массивных устройств из СПФ является сложность

в обеспечении их быстрого охлаждения ввиду возможности одновременного начала мартенситного преобразования их кристаллической структуры в различных областях изделия, и возникновения при этом больших внутренних напряжений с риском возникновения трещин, вплоть до саморазрушения.

1. ОДНОХОДОВЫЕ УСТРОЙСТВА

Задачей одноходовых устройств является их одноразовое срабатывание с переходом в новое геометрическое состояние, что обычно происходит при достижении заранее установленной температуры. Такие решения все более широко используются в медицине, противопожарной защите, адаптивных конструкциях летательных аппаратов (ЛА), (рис.1-8).

1.1. Медицина.

Расширяющееся использование сплавов NiTi (никелид титана) в медицине [5] обусловлено их высокой коррозионной стойкостью, биологической инертностью, хорошим комплексом механических и специальных свойств. Этот материал при температурах до 50°C обладает сверхупругим поведением, когда большие (до 12%) относительные деформации кристаллической решетки полностью устраняются при разгрузке. Такое поведение адекватно механическому поведению биологических тканей, поэтому из NiTi можно создавать имплантаты, механически совместимые с костными, связочно-хрящевыми и другими структурами организма (рис.1,2).

Основными направлениями использования нитинола в медицине можно считать следующие:

1. Имплантаты и инструмент, эксплуатируемые только в сверхупругом состоянии. Как правило, это изделия небольших размеров, легко деформируемые руками или специальным инструментом. Примером таких изделий могут служить различные стенты и графты (рис.1), предназначенные для дилатации внутренних полостей организмов, вводимые в эти полости эндоскопически. На рис.2 показаны сверла для зубных каналов из СПФ, безопасность работы с которыми обеспечивается их сверхупругостью.

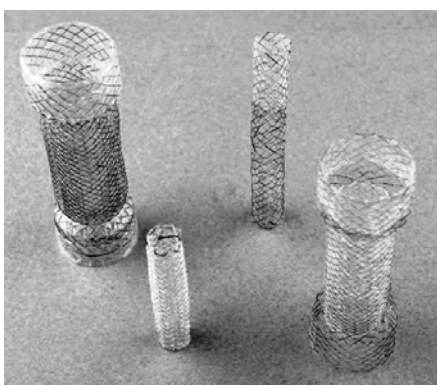


Рис.1. Стенты и графты из СПФ для дилатации внутренних полостей (По патенту РФ 2089131).

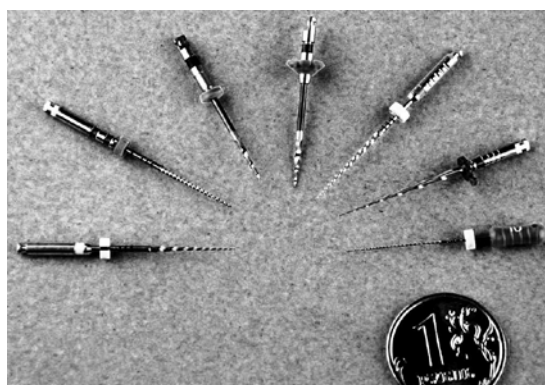


Рис.2. Сверла для зубных каналов из СПФ [5].

2. Имплантаты, реализующие как эффект памяти формы, так и сверхупругость. Такие имплантаты используются, в основном, для остеосинтеза, исправления деформаций опорно-двигательного аппарата пациента (сколиоза, воронкообразной деформации грудной клетки и др.). К ним предъявляются требования возможности изменения формы в охлажденном состоянии для удобства установки в организм. При нагреве до температуры тела имплантаты должны восстанавливать свою исходную форму и оказывать силовое воздействие (компрессию или дистракцию) на структуры организма. В то же время при температуре, равной температуре тела пациента, имплантаты должны проявлять сверхупругое поведение, чтобы обеспечить адекватность своего механического поведения поведению биологических структур (рис.3,4), которые этот имплантат замещает или укрепляет.

3. Экзо- и эндопротезы, в которых нитинол используется как армирующий элемент композиционного материала, обеспечивающий высокую подвижность протеза за счет сверхупругой деформации (замена шарнирных соединений на упругие), либо многоцикловые изменения формы экзопротеза при обеспечении его достаточной прочности (возможность многократного изменения формы эндопротеза кисти и т.п.).

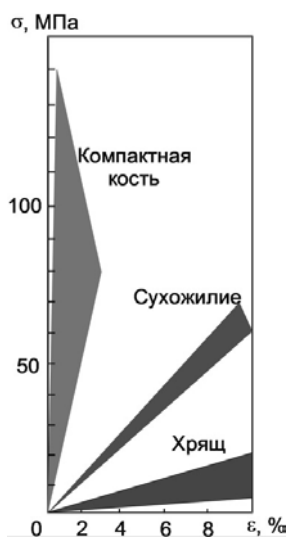


Рис.3. Диаграммы σ - ϵ биологических тканей [5].

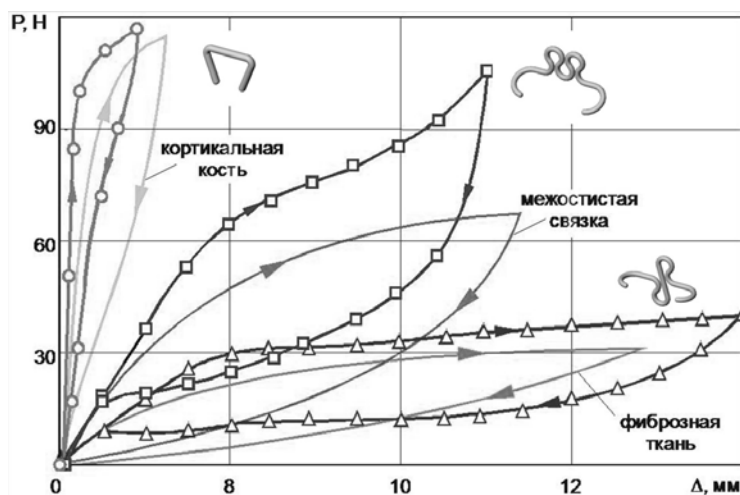


Рис.4. Рабочие области типовых имплантатов из NiTi [5].

Для каждого из указанных направлений применения СПФ в медицине различаются требования к функциональным свойствам материала и, соответственно, к его химическому составу, структуре и технологии производства. Так, для первого направления материал должен обладать высокими сверхупругими характеристиками в широком диапазоне температур ($-20 \div +40^\circ\text{C}$). Это может быть обеспечено на сплавах никелида титана с повышенным содержанием никеля и подвергнутых значительной тепловой или холодной деформации. Имплантаты второго направления применения должны обеспечивать восстановление формы в строго заданном диапазоне температур ($26 \div 36^\circ\text{C}$), что достигается специальной термомеханической обработкой сплавов с несколько большим содержанием никеля по сравнению с эквиатомным составом. В изделиях третьего направления могут использоваться сплавы как с повышенным

содержанием никеля ($A_k < 36^\circ\text{C}$), так и с пониженным ($A_k > 36^\circ\text{C}$). Конкретный состав сплава и технология его изготовления и использования определяется медико-техническими требованиями к изделиям.

Свойства NiTi позволяют придавать имплантату в охлажденном состоянии (при температурах от $+5$ до $+10^\circ\text{C}$) форму, удобную для установки в организме пациента, а при нагреве до температуры тела имплантат стремится вернуться к исходной форме, оказывая на структуры организма необходимое силовое воздействие и обеспечивая связь поврежденных биологических тканей. Из СПФ изготавливают стенты для дилатации кровеносных сосудов, фиксаторы фрагментов кости при лечении переломов, имплантаты для стабилизации позвоночных сегментов, сверхупругий инструмент и др. Потенциал применения СПФ в медицине используется в настоящее время не более, чем на 5%. Это обусловлено сложностью придания материалу и имплантатам строго заданных температур восстановления формы (температура конца обратного мартенситного превращения должна быть равна $35 \pm 1^\circ\text{C}$).

Для уникальных устройств на основе NiTi, настроенных на узкий диапазон температур срабатывания, главной проблемой является обеспечение регламентированных температур мартенситного превращения и силовых характеристик сплавов. Отбраковка материала и изделий по этим показателям приводит к значительному повышению стоимости готовой продукции и ограничению применения СПФ.

1.2. Нефтегазовая индустрия.

Высокая возгораемость нефтегазовых смесей и сложность оперативного доступа к местам аварий, особенно при пожаре, делает актуальным создание приводов, способных автоматически реагировать на опасную ситуацию. Высокая температура, возникающая при пожаре, может служить и сигналом, и источником энергии для срабатывания устройств с заранее определенными действиями (поведением). Рассматриваются одноходовые механизмы – превенторы, заслонки и иные устройства, перекрывающие буровые трубы или газопроводы при аварийных выбросах нефти и газа, при их возгорании и повышении температуры труб, в том числе изделий из СПФ, выше заданного уровня.

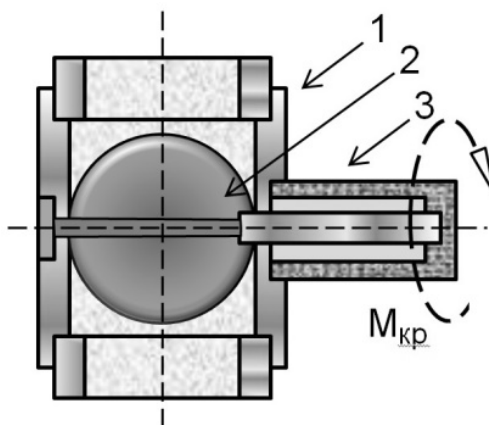


Рис.5. Схема превентора для нефтегазовой трубы. 1 – корпус, 2 – заслонка, 3 – актуатор кручения. [5].

На рис.5 показана модель превентора, у которого актуатор вынесен наружу перекрываемой трубы. Для срабатывания таких устройств не требуется

вмешательства оператора. Устройство состоит только из жестко связанных элементов, «интеллектуально» реагирующих на критическую температуру. Затраты на проектирование, изготовление и эксплуатацию такого «интеллектуального» превентора на порядки ниже, чем стоимость аварийных работ при разливе сотен тонн нефти на обводненных территориях. Особенно актуальны будут такие решения при выходе в Северный ледовитый океан, где вообще недопустимы разливы нефти, поскольку ни у одной страны мира сегодня нет способов борьбы с ними.

1.3. Самонастройка воздухозаборника летательного аппарата.

Большинство ЛА с прямоточными воздушно-реактивными двигателями имеет нерегулируемые воздухозаборники, что приводит к недобору тяги на некоторых режимах их полета. Это связано с большой сложностью традиционных конструктивных решений, предусматривающих наличие датчиков, приводов и системы управления. Использование СПФ позволяет совместить в достаточно простых по форме активных элементах конструкции функции датчика, анализатора и привода. Задача сводится к определению долевого состава СПФ, обеспечивающего прохождение мартенситных преобразований и связанных с ним изменений формы в определенном диапазоне температур, а также термоциклированию, предопределяющему траектории перемещения избранных точек конструкции. Высокие скорости полета ЛА позволяют решить проблему управления формой без создания сложных систем, а именно, за счет возрастания температуры торможения набегающего потока при смене режима полета, приводящего к аэродинамическому нагреву конструкции ЛА. Температура торможения потока достаточна для нагревания обтекаемой поверхности конструкции и обеспечивает срабатывание активных элементов. Экспериментальные работы по саморегулированию выполнены на модели плоского воздухозаборника воздушно-реактивного двигателя с размерами пластин активных элементов 85х45 мм и толщиной 3,5 мм (рис.6).

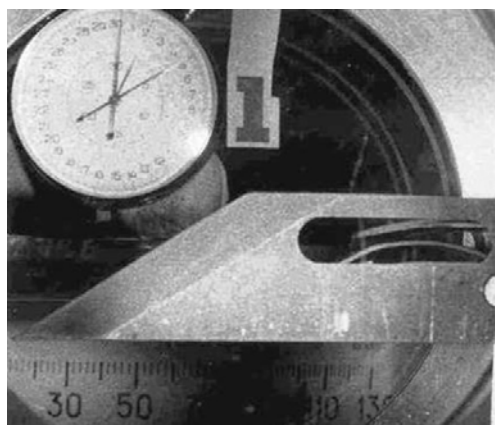


Рис.6. Кадр киносъемки эксперимента с саморегулируемым воздухозаборником ЛА [2].

В ходе эксперимента было обеспечено саморегулирование высоты входа и высоты горла воздухозаборника, а также угла поднутрения обечайки. Необходимая относительная деформация, связанная с потребной величиной вертикального хода передней кромки составила 0,9–1,8%, а для накладке на центральное тело модели составила 2,3–4,5%. Реактивные напряжения,

развиваемые в процессе восстановления формы, не превышали уровня 390–600 МПа. Коэффициент отношения тяги двигателей с саморегулируемым и нерегулируемым воздухозаборниками для различных чисел Маха, характеризующих скорость полета, достигал величины 1,77 [2].

2. ЦИКЛИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА

2.1. Лабораторные работы.

В лаборатории прочности Факультета аэромеханики и летательной техники (ФАЛТ) МФТИ проводятся работы по демонстрации возможностей актуаторов из СПФ для преобразования формы и управления деформациями конструкций [7]. На рис.7 показана модель циклического привода кручения цельноповоротного вертикального оперения ЛА на основе СПФ. Нагрев актуатора производится электрической спиралью. На рис.8 показан стенд для исследования способов управления углом атаки модели замкнутого крыла с использованием актуатора из СПФ. Здесь на замкнутое крыло ЛА воздействует S-образный элемент из СПФ, моделирующий собой адаптивную шайбу, установленную на полуразмахе системы элементов замкнутого крыла. Показано, что нагрев адаптивного элемента из СПФ приводит к увеличению угла атаки системы крыльев в центральной части полуразмаха на 3–5 градусов. То есть, имеется возможность изменять интегральный угол атаки крыла ЛА, не изменяя угол атаки его фюзеляжа. При снятии нагрева с адаптивного элемента жесткость закрученной системы замкнутого крыла выполняет роль возвратной пружины и приводит ее в исходное положение.

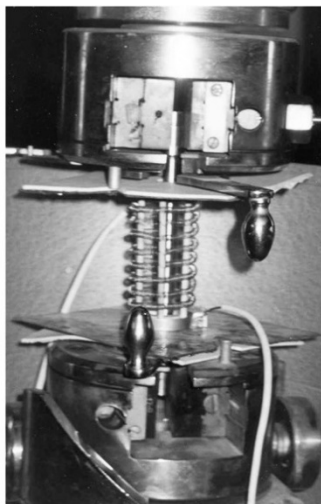


Рис.7. Модель циклического привода кручения цельноповоротного оперения ЛА. ФАЛТ МФТИ. (авт. Семенов В.Н., Щербаков В.Н.)

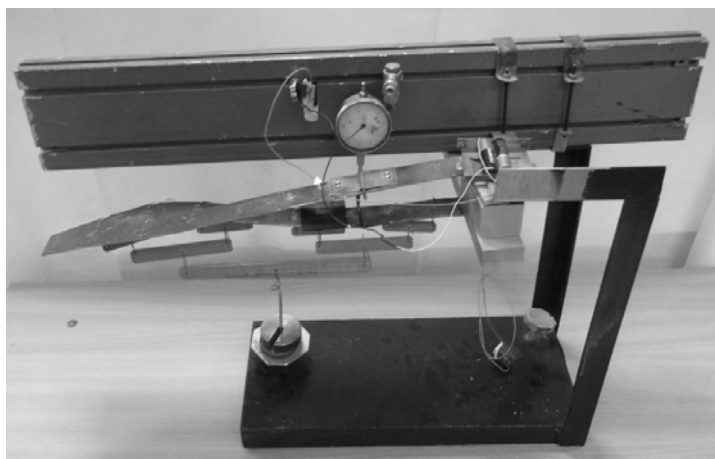


Рис.8. Стенд для исследования способов управления углом атаки модели замкнутого крыла с использованием актуатора из СПФ. ФАЛТ МФТИ. (авт.Семенов В.Н., Щербаков В.Н., Волков И.В., Внуков Е.М., Фон Мьинт Тун).

2.2. Авиация.

Исследования в области авиации сосредоточены на решении следующих задач:

- разработка актуаторов для преобразования и саморегулирования формы и взаимного расположения элементов конструкции (профиль крыла, канал воздухозаборника);
- разработка систем активного управления геометрией ЛА (адаптация), а также жесткостью связей элементов и подконструкций;
- демпфирование колебаний и управление вибрациями.

Летательный аппарат (ЛА) подвергается сложному комплексу эксплуатационных нагрузок, при этом регламентируемые запасы прочности ЛА определяются по наиболее тяжелым случаям нагружения. В остальное время полета ЛА его запасы прочности не используются, что приводит к снижению весовой эффективности ЛА. Одним из перспективных путей достижения высоких характеристик ЛА является адаптация его к режиму полета.

2.3. Адаптивные конструкции летательных аппаратов.

Активное управление аэродинамическими и жесткостными характеристиками несущих и управляющих поверхностей ЛА позволит обеспечить ему регламентируемые запасы по аэроупругости [6] на всех режимах полета без чрезмерного увеличения веса конструкции ЛА. Преобразование к оптимальной рабочей конфигурации ЛА при переходе от взлетно-посадочных режимов к полетным может быть достигнуто путем разворота движителей относительно фюзеляжа ЛА или путем изменения взаимного расположения агрегатов, вплоть до их полного смыкания, изменением углов стреловидности и крутки крыла, изменения длины и крутки лопастей винта и других преобразований [5,7]. При этом использование деформационных актуаторов, основанных на свойствах СПФ, обеспечивает ряд преимуществ, связанных с целостностью силовой структуры ЛА и отсутствием кинематических пар (механизмов) [2,3,7].

Сопоставление различных типов транспортных средств для использования в условиях Севера и арктического шельфа показало, что для оперативных целей на местных авиалиниях наиболее подходящими могут быть ЛА легких классов, в том числе самолеты, с взлётным весом до 8600 кгс, вертолёты с взлётным весом до 4500 кгс, конвертопланы, с взлетным весом до 10000 кгс (этот параметр пока не регламентирован), перевозящие до 19 пассажиров. В набор требований к такому ЛА входят, в первую очередь, вертикальные взлет и посадка, максимальная дальность полета до 1500 км, крейсерская скорость до 500 км/час, коммерческая нагрузка – до 2,5 т., топливная экономичность в 3-4 раза более высокая, чем у вертолета. Анализ существующих и перспективных транспортных средств показал, что рациональное техническое решение может быть найдено в области адаптивных конструкций, которые особенно эффективны для ЛА с вертикальными взлетом и посадкой. Исследования [8] показали, что для отечественного конвертоплана, с вертикальными взлетом и посадкой, необходимые характеристики могут быть достигнуты с использованием новых российских двигателей ВК-2500, прототипом которых явились советские вертолетные двигатели ТВ7-117, выпускавшиеся в Запорожье.

Для решения задач адаптации ЛА к режиму полета наиболее приемлемыми представляются трубчатые актуаторы, работающие на кручение, и одновременно выполняющие роль несущих элементов конструкции, например, участки лонжерона крыла, либо цельноповоротного вертикального оперения. При создании массивных устройств из СПФ важно обеспечить равномерность поля температур внутри привода, так как перепады температуры ведут к разновременности начала мартенситных переходов в разных зонах устройства, что может вызвать разрушительные внутренние напряжения.

ВЫВОДЫ

Для технических приложений наиболее ценными из свойств СПФ являются: эффект памяти формы, возвращающий при нагревании изделия его первоначальную «запомненную» форму; высокая удельная прочность; мощные силовые реакции, вызываемые нагревом; почти трехкратное изменение модуля упругости при мартенситном преобразовании; обратимость эффекта памяти формы, позволяющая организовать замкнутые рабочие циклы. Максимальные деформации исполнительных элементов из сплава NiTi не должны превосходить $\varepsilon = 4 \div 8\%$, а максимальные напряжения в них не должны превосходить $\sigma = 400 \div 800 \text{ МПа}$.

Высокая коррозионная стойкость, биологическая инертность, приемлемый комплекс механических и специальных характеристик, совместимых со свойствами и поведением биологических тканей, позволяют создавать из NiTi имплантаты, механически совместимые с костными, связочно-хрящевыми и другими структурами организма. Соответствующий сплав при температурах до 50°C обладает сверхупругим поведением, когда большие (до 12%) деформации кристаллической решетки полностью устраняются при разгрузке.

Факторами, тормозящими широкое внедрение интеллектуальных материалов и устройств на их основе, являются: высокая наукоемкость расчета и проектирования, малые масштабы производства и, следовательно, дороговизна процессов и материалов. Поэтому, в первую очередь, внедрение СПФ идет в таких областях, где потребитель готов платить высокую цену за функциональные возможности новых изделий. Такими отраслями являются космос, пожарное дело, медицина. Следующими массовыми потребителями наукоемких изделий из СПФ могут стать авиация и нефтегазовая индустрия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лихачев В.А., Кузьмин С.Л., Каменцева З.П. *Эффект памяти формы*. – Л.: Издательство ЛГУ. – 1987. – 216 с.
2. Семенов В.Н., Вяххи И.Э., Гончарук П.Д., Лаврухин Г.Н., Мовчан А.А. *Технические решения для адаптивных авиационных конструкций с использованием сплавов с памятью формы* // Ученые записки ЦАГИ. – 2007. – Т. XXXVIII. – №3-4. – С.158-168.
3. Семенов В.Н. *Конструкции самолетов замкнутой и изменяемой схем.* – М.: Издание ЦАГИ, 2006. – С.187-214.

4. Гамлицкий Е.Ю., Гелиев А.В., Семенов В.Н. *К наномодификации поверхности перспективных конструкций* // Известия Коми научного центра УрО РАН. – 2014. – №3. – С.112-120.
5. Коллеров М.Ю., Семенов В.Н. *Прикладные вопросы использования сплавов с памятью формы* / XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Сборник трудов. – Казань, 2015. – С.1905-1907.
6. Войтышен В.С., Семенов В.Н. *Решение задачи аэроупругости в переменных метода конечных элементов (МКЭ)* // Известия Коми научного центра УрО РАН. – 2013. – №4. – С.68-72.
7. Семенов В.Н., Фон Мьинт Тун. *Рациональные параметры замкнутого крыла самолета для обеспечения минимума веса его конструкции* / Международная научно-практическая конференция «Технические науки в мире: от теории к практике». – Ростов-на-Дону, 2014. – С.52-55.
8. Семенов В.Н., Лазарев А.Ю., Рудометкин А.П. *Проектирование масштабной модели конвертоплана* / 1-й Международный научный семинар «Экстремальные и рекордные полеты БПЛА и ЛА с электрическим двигателем». Труды. – Москва-Раменское, 2013. – С.95-199.

REFERENCES

1. Likhachev V.A., Kuzmin S.L., Kamentseva Z.P. *Effekt pamiaty formy [The effect of shape memory]*. Leningrad, Izdatel'stvo LGU, 1987, 216 p.
2. Semenov V.N., Vakhi I.E., Goncharuk P.D., Lavrukhin G.N., Movchan A.A. *Tekhnicheskie resheniia dlia adaptivnykh aviatsionnykh konstruksii s ispol'zovaniem splavov s pamiat'iu formy [Technical solutions for adaptive aerial structures using alloy with shape memory]*. Uchenye zapiski TsAGI, 2007, Vol.XXXVIII, No.3-4, Pp.158-168.
3. Semenov V.N. *Konstruksii samoletov zamknutoi i izmeniaemoi skhem [Constructions of airplanes of closed and variable circuits]*. Moskva, Izdanie TsAGI, 2006, Pp.187-214.
4. Gamlitskiy E.Yu., Geliev A.V., Semenov V.N. *K nanomodifikatsii poverkhnosti perspektivnykh konstruksii [To nanomodify the surface of perspective structures]*. Izvestiya Komi nauchnogo centra UrO RAN, 2014, No.3, Pp.112-120.
5. Kollerov M.Yu., Semenov V.N. *Prikladnye voprosy ispol'zovaniia splavov s pamiat'iu formy [Applied questions of the use of alloys with shape memory]* / XI Vserossiiskii s"ezd po fundamental'nym problemam teoreticheskoi i prikladnoi mekhaniki, Kazan', 2015, Pp.1905-1907.
6. Voytishen V.S., Semenov V.N. *Reshenie zadachi aerouprugosti v peremennykh metoda konechnykh elementov (MKE) [Solution of the problem of aeroelasticity in variables of the finite element method (FEM)]*. Izvestiia Komi nauchnogo tsentra UrO RAN, 2013, No.4, Pp.68-72.
7. Semenov V.N., Phone Myint Tun. *Ratsional'nye parametry zamknutogo kryla samoleta dlia obespecheniia minimuma vesa ego konstruksii [Rational parameters of the closed wing of the aircraft to ensure a minimum weight of its design]*. Mezhdunarodnaia nauchno-prakticheskaiia konferentsiia «Tekhnicheskie nauki v mire: ot teorii k praktike». Rostov-na-Donu, 2014, Pp.52-55.

8. Semenov V.N., Lazarev A.Y., Rudometkin A.P. *Proektirovanie masshtabnoi modeli konvertoplana*. The proceedings of the First International Scientific Workshop Extremal and Record-Breaking flights of the UAVs And the Aircraft with electrical power plant. ERBA. Moscow – Ramenskoe, Russia, 23-26 August 2013, Pp.195-199.

Поступила в редакцию 16 января 2017 года

Сведения об авторах:

Войтышен Владимир Семенович – н.с., ФГУП «Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского», г. Жуковский, Россия; e-mail: voityshen@mail.ru
Коллеров Михаил Юрьевич – д.т.н., проф., ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва, Россия; e-mail: kollerov@gmail.com
Семенов Владимир Николаевич – д.т.н., г.н.с., ФГУП «Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского», г. Жуковский, Россия; e-mail: semenov_vlanik@mail.ru
Щербаков Владимир Николаевич – нач. сектора, ФГУП «Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского», г. Жуковский, Россия; e-mail: vlad5107@mail.ru
Фон Мьинт Тун – аспирант, ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт (государственный университет)», г. Долгопрудный, Россия; e-mail: phonemyintun52@gmail.com