

Научная статья

УДК 539.4

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=177659>

СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ УВЕЛИЧЕНИЯ ВНУТРЕННЕГО РАДИУСА ТОЛСТОСТЕННОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ МУФТЫ ИЗ СПЛАВА С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ

Алексей Валерьевич Шарунов

ПАО ОАК – «ОКБ Сухого»

Москва, Россия

aleksej-sharunov@yandex.ru

Аннотация. Одно из наиболее перспективных применений сплавов с памятью формы (СПФ) в авиационной промышленности [1,2] заключается в изготовлении из них муфт, предназначенных для термомеханического соединения (ТМС) трубопроводов. В настоящее время в ОКБ «Сухого», проведен анализ возможности применения вышеуказанных сплавов в гидравлической системе ЛА, выявлены зоны предпочтительного использования муфтовых соединений из СПФ в конструкции планера («сухие зоны», «закладные зоны» под композиционными панелями). Также рассматривалось применение муфтовых соединений из СПФ для проведения ремонтных работ топливных и гидравлических систем ЛА непосредственно в местах базирования и эксплуатации ЛА.

В рамках работы были разработаны математические модели материала СПФ в программном комплексе конечно – элементного моделирования Simulia Abaqus, способные описывать функциональные свойства СПФ, реализуемые в процессе всего жизненного цикла муфты из этого материала. Кроме того, модели обладают высоким уровнем доступности и могут быть использованы при решении большинства технических проектов по внедрению в конструкцию ЛА элементов из СПФ, в том числе при проектировании термомеханических соединений с применением муфт из этого материала. А также предложены два альтернативных способа увеличения внутреннего радиуса муфты из СПФ, проведено сравнение с используемым в настоящее время методом дорнирования, выявлен оптимальный подход.

Достоверность результатов работы подтверждена валидацией разработанных программных модулей по результатам натуральных испытаний элементарных образцов на базе системы Ni-Ti и верификацией по известным аналитическим решениям модельных краевых задач механики СПФ.

Ключевые слова: сплавы с памятью формы, термомеханическое муфтовое соединение, гидравлическая и топливная системы ЛА, метод конечных элементов, Simulia Abaqus, напряженно – деформированное состояние

Для цитирования: Шарунов А.В. Сравнение различных способов увеличения внутреннего радиуса толстостенной цилиндрической муфты из сплава с памятью формы // Труды МАИ. 2023. № 133. URL:

<https://trudymai.ru/published.php?ID=177659>

Original article

DETERMINATION OF THE OPTIMAL WAY TO INCREASE THE INNER RADIUS OF A THICK-WALLED CYLINDRICAL COUPLING MADE OF SHAPE MEMORY ALLOY

Alexey V. Sharunov

PJSC UAC Sukhoi Design Bureau,

Moscow, Russia

aleksej-sharunov@yandex.ru

Abstract. One of the most promising applications of SMA in the aviation industry is the manufacture of couplings from them designed for thermomechanical connection (TMC) of pipelines. Currently, in the Sukhoi Design Bureau, an analysis of the possibility of using the above alloys in the hydraulic system of the aircraft has been carried out, zones of preferred use of SMA couplings in the airframe design have been identified ("dry zones", "embedded zones" under composite panels). The use of coupling joints from SMA was also considered for carrying out repair work of fuel and hydraulic systems of aircraft directly in the places of basing and operation of aircraft.

As part of the work, mathematical models of SMA material were developed in the Simulia Abaqus finite element modeling software package, capable of describing the functional properties of SMA implemented during the entire life cycle of a coupling made of this material. In addition, the models have a high level of availability and can be used in solving most technical projects for the introduction of SMA elements into the design of aircraft, including when designing thermomechanical connections using couplings made of

this material. Two alternative ways of increasing the internal radius of the SPF coupling are also proposed, a comparison with the currently used dorning method is carried out, and the optimal approach is identified.

The reliability of the results of the work is confirmed by the validation of the developed software modules based on the results of field tests of elementary samples based on the Ni-Ti system and verification by known analytical solutions of model boundary value problems of SMA mechanics.

Keywords: shape memory alloys, thermomechanical coupling, hydraulic and fuel systems of aircraft, finite element method, Simulia Abaqus, stress–strain state

For citation: Sharunov A.V. Determination of the optimal way to increase the inner radius of a thick-walled cylindrical coupling made of shape memory alloy. *Trudy MAI*, 2023, no. 133. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=177659>

1. Введение

К СПФ [3] относятся металлические сплавы, претерпевающие фазовые превращения при изменении температуры и/или напряженного состояния при тепловом, механическом, электромагнитном или комбинированном внешнем воздействии. Фазовые превращения порождают ряд необычных свойств СПФ, используемых в инженерных приложениях. В частности, СПФ демонстрируют способность к восстановлению исходной недеформированной формы после неупругого деформирования при нагреве выше определенной температуры. Данное

явление называется эффектом памяти формы. Наиболее широко распространены сплавы типа «нитинол» на базе системы Ni-Ti.

Одно из наиболее перспективных применений СПФ в авиационной промышленности заключается в изготовлении из них муфт, предназначенных для термомеханического соединения (ТМС) трубопроводов [4-6]. В рамках работ, проводимых в ОКБ «Сухого» были выявлены зоны предпочтительного использования муфтовых соединений из СПФ (рис.2) в гидравлической системе ЛА («сухие зоны», «закладные зоны» под композиционными панелями) взамен используемым в данный момент соединениям трубопроводов по наружному конусу или путем сварки (рис.1). Также рассматривалось применение муфтовых соединений из СПФ для проведения ремонтных работ топливных и гидравлических систем ЛА непосредственно в местах базирования и эксплуатации ЛА.

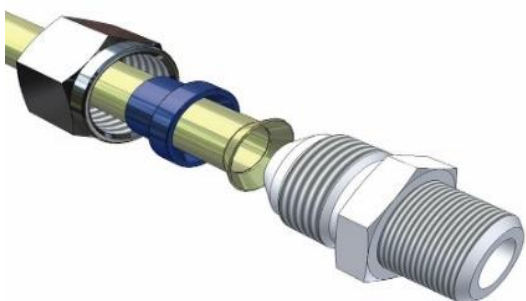


Рис. 1. Соединения трубопроводов гидравлической системы ЛА.

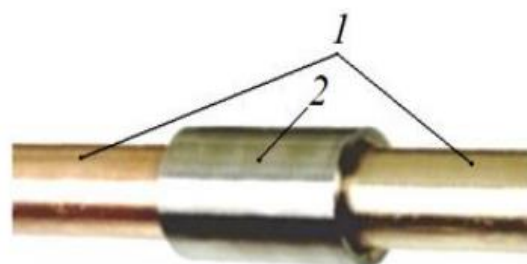


Рис. 2. Муфтовое соединение из СПФ:
1 - стальные трубы; 2 - муфта из СПФ

Получаемое муфтовое ТМС из СПФ характеризуется высокой надежностью и скоростью монтажа, высокой вибрационной и коррозионной стойкостью, возможностью соединения труб из разных материалов и разных толщин, отсутствием зон термического влияния и электрического воздействия, абсолютной

пожаровзрывобезопасностью, повышенной надежностью вследствие низкого влияния человеческого фактора при монтаже.

Принцип ТМС трубопроводов заключается в следующем: из СПФ изготавливают муфту с внутренним диаметром меньшим, чем диаметр соединяемых деталей трубопроводов. Далее при определенных температурно-скоростных условиях внутренний диаметр муфты расширяют путем дорнирования (механического наведения деформаций). Увеличенная в размерах муфта свободно устанавливается на соединяемые детали. При нагреве муфта восстанавливает свою первоначальную форму и обжимает концы трубопроводов, обеспечивается герметичное и прочное соединение (рис.3).

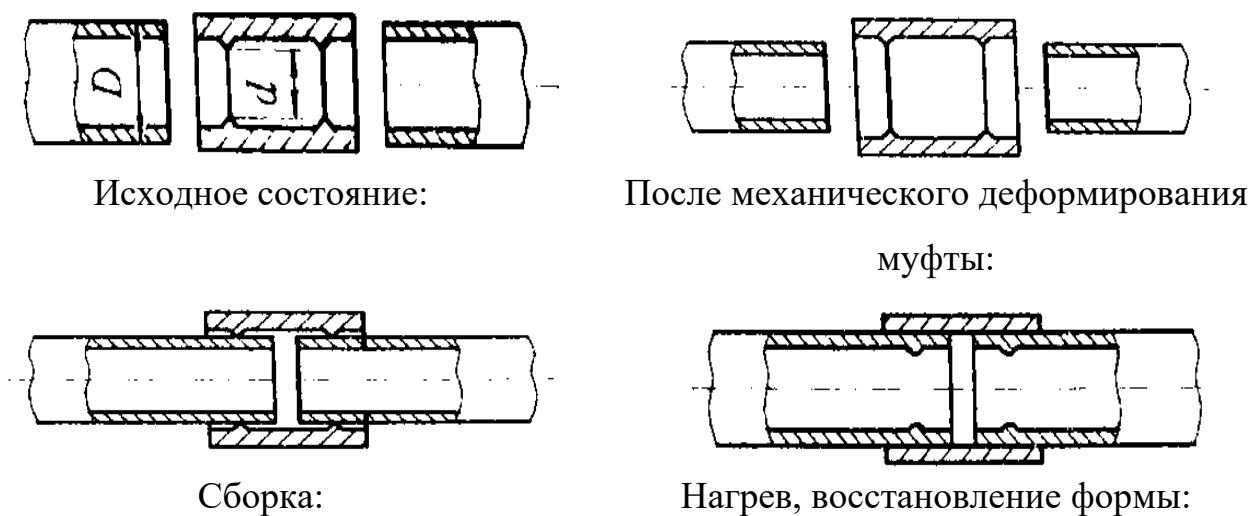


Рис.3. Схема получения разъёмного ТМС с применением муфты из сплава с памятью формы.

Одним из наиболее критичных моментов при изготовлении муфтовых соединений из СПФ является процесс увеличения внутреннего радиуса муфты путем дорнирования (механического наведения деформаций) который в

большинстве случаев приводит к механическим повреждениям внутренней функциональной поверхности муфты, кратно снижая ее надежность.

Кроме того, применение СПФ в качестве материала соединительных муфт [7,8] влечет за собой необходимость проведения большого количества натуральных испытаний с целью определения геометрических параметров и материала муфт, а также определение напряжений в деталях получаемого термомеханического соединения. Проведение подобных расчетов аналитическими методами затруднено в виду объективной сложности определяющих соотношений СПФ, неоднородности распределения НДС по сечению оболочки, а также необходимости учета разносопротивляемости СПФ [9,10]. Для случая раздачи муфты в процессе прямого превращения также необходимо учитывать влияние действующих напряжений на температуры фазовых переходов [11]. В работах [12,13] получены аналитические решения подобных задач, однако в них не учитывалось влияние свойства разносопротивляемости СПФ. В работе [14] получено аналитическое решение задачи о раздаче тонкостенной муфты из СПФ, как в режиме мартенситной неупругости, так и в процессе прямого термоупругого мартенситного превращения, однако, используемые на практике соединительные муфты из СПФ, как правило, нельзя считать тонкостенными.

Решением отмеченных проблем может быть применение при анализе термомеханического поведения СПФ метода конечных элементов. Известны работы [15-22], в которых проведен анализ НДС различных конструкций из СПФ.

Однако в каждой из них не учитывается влияния вида напряженного состояния на НДС.

В рамках работы была произведена интеграция, посредством процедуры создания пользовательского материала, модели нелинейного деформирования СПФ при фазовых и структурных превращениях [23-27] в программный комплекс конечно – элементного моделирования Simulia Abaqus, способные описывать функциональные свойства СПФ, реализуемые в процессе всего жизненного цикла муфты из этого материала.

В ходе работы выполнено численное решение задачи увеличения внутреннего радиуса толстостенной цилиндрической оболочки из СПФ и проведено сравнение полученных результатов для двух альтернативных способов раздачи, не повреждающих внутреннюю поверхность муфты:

- 1) Увеличение внутреннего радиуса муфты монотонно возрастающим внутренним давлением в состоянии хаотического мартенсита. Процесс считается изотермическим.
- 2) Увеличение внутреннего радиуса муфты в процессе прямого мартенситного фазового перехода при действии постоянного внутреннего давления.

2. Разрешающие соотношения, реализованные в ПК Simulia Abaqus

В настоящее время существует множество разнообразных макро и микромеханических моделей, математически описывающих поведение СПФ. Большинство из них не способны описать термомеханические процессы,

проистекающие в материале муфтового соединения из СПФ в процессе ее жизненного цикла. Это делает невозможным достоверное определение НДС муфты из СПФ, существенно повышается трудоемкость проектирования муфтового соединения. Проведение подобных расчетов аналитическими методами затруднено в виду неоднородности распределения НДС по сечению оболочки, необходимости учета разносопротивляемости СПФ, а также влияния действующих напряжений на температуры фазовых переходов. Для решения данного вопроса используется зарекомендовавший себя метод конечных элементов.

Широкое применение в механике СПФ нашли модели, описанные зарубежными авторами Lagudas D.C. и Auricchio F. [28,29], имеющие ряд недостатков. Они позволяют описать либо только режимы сверхупругости и мартенситной неупругости (структурный переход под действием постоянно возрастающих напряжений), либо не учитывают зависимость накапливаемых при прямом превращении деформаций от величины действующих напряжений и нелинейную зависимость температур фазового перехода от действующих напряжений.

В рамках представленной работы предлагается использование модели нелинейного деформирования СПФ при фазовых и структурных превращениях [23-27], которая лишена вышеуказанных недостатков.

В рамках рассматриваемой модели предполагается аддитивное представление тензора приращений полных деформаций, при их малости.

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^{phst} + d\varepsilon_{ij}^T \quad (1.1)$$

где ε_{ij} , ε_{ij}^e , ε_{ij}^{phst} – полная, упругая, и фазово - структурная деформации соответственно.

Для реализации выбранной модели нелинейного деформирования при фазовых и структурных превращениях был выбран ПК Simulia Abaqus поскольку в нем имеется возможность внедрения пользовательской модели материала по технологии UMAT. Однако для использования данной технологии требуется явное вычисление компонент касательной матрицы жесткости C_{ijkl} . Компоненты матрицы C_{ijkl} связывают компоненты тензоров приращений напряжений и приращений деформаций. В рамках рассматриваемой модели определяющие соотношения разрешены относительно приращений деформаций и для определения матрицы C_{ijkl} требуется их обращение [27].

2.1. Обращенные соотношения для описания нагружения в режиме мартенситной неупругости

Связь между компонентами приращений скоростного девиатора напряжений и деформаций устанавливается следующим соотношением:

$$d\sigma'_{ij} = 2G_M d\varepsilon'_{ij} - \lambda \sigma'_{ij} \sigma'_{kl} d\varepsilon'_{kl} \quad (1.2)$$

$$\lambda = 9\rho_D(\mu_\sigma) \frac{G_M^2}{\sigma_i^2} \frac{F'(\sigma_i)}{(1 + 3G_M \rho_D(\mu_\sigma) F'(\sigma_i))} \quad (1.3)$$

$$F'(\sigma_i) = \frac{1}{\Gamma(\alpha(\mu_\sigma))} \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_0(\mu_\sigma)} \right)^{\alpha(\mu_\sigma)-1} \exp\left(\frac{-\sigma_i}{\sigma_0(\mu_\sigma)} \right) \frac{1}{\sigma_0(\mu_\sigma)} \quad (1.4)$$

здесь $d\sigma'_{ij}$, $d\varepsilon'_{ij}$ – скоростной девиатор приращений напряжений и деформаций,

Шаровая часть тензора приращений напряжений определяется по формуле, приведенной ниже:

$$d\sigma_{kk} = K_M d\varepsilon_{kk} \quad (1.5)$$

здесь $d\varepsilon_{kk}$ – утроенный первый инвариант скоростного тензора приращений деформаций.

Приращение компонент тензора напряжений вычисляется следующим образом:

$$d\sigma_{ij} = \frac{1}{3} d\sigma_{kk} \delta_{ij} + d\sigma'_{ij} \quad (1.6)$$

Здесь - δ_{ij} – дельта Кронекера.

2.2. Обращенные соотношения для описания нагружения в процессе прямого превращения

Связь между компонентами приращений скоростного тензора напряжений и деформаций устанавливается следующим соотношением:

$$d\sigma_{ij} = \left[2G(q) d\varepsilon'_{ij} + \frac{K(q) \delta_{ij} d\varepsilon_{kk}}{3} \right] - \left[2G(q) A_{ij}^+ + 3K(q) B \delta_{ij} \right] dq \quad (1.7)$$

$$\frac{1}{G(q)} = \frac{q}{G_M} + \frac{1-q}{G_A}, \quad \frac{1}{K(q)} = \frac{q}{K_M} + \frac{1-q}{K_A} \quad (1.8)$$

Приращение параметра фазового состава dq определяется как приведено ниже:

$$dq = M \left[\frac{\sigma_i dt^+ + 3G(q) f_1 \sigma'_{ij} d\varepsilon'_{ij}}{\sigma_i + 3G(q) M f_5} \right], \quad M = \pi \sqrt{q(1-q)} \quad (1.9)$$

здесь σ'_{ij} , σ_i – девиатор напряжений и его второй инвариант.

$$f_1 = \frac{\rho_D(\mu_\sigma)(\varphi_1 + \sigma_i \varphi'_1) + \Delta G \sigma_i / (3G_A G_M)}{\Delta S (M_s^0 - M_f^0)}, \quad f_3 = \frac{\Delta G \sigma_i^2}{3G_A G_M} + \rho_D(\mu_\sigma) \sigma_i \varphi_1, \quad (1.10)$$

$$f_5 = f_1 f_3, \quad \Delta G = G_A - G_M$$

$$A_{ij}^+ = \sigma_{ij}' \left(\frac{\Delta G}{2G_A G_M} + \frac{3}{2} \frac{\rho_D(\mu_\sigma) \varphi_1}{\sigma_i} \right), \quad B = \frac{\Delta K \sigma_{kk}}{3K_A K_M}, \quad (1.11)$$

$$\varphi_1 = 1 - \exp(-\sigma_i / \sigma_0(\mu_\sigma)), \quad \Delta K = K_A - K_M$$

Процесс валидации и верификации разработанной модели пользовательского материала в ПК Simulia Abaqus показан в работах [30-31].

3. Постановка задачи

Рассматривается задача увеличения внутреннего радиуса толстостенной цилиндрической муфты из СПФ в трехмерной по пространству постановке в цилиндрической системе координат $r-\theta-z$. Рассматриваемая задача решается при двух типах граничных условий:

Закрепление перемещений по торцам муфты от осевых смещений (деформации в осевом направлении равны нулю) в дальнейшем модель 1.

Закрепление перемещений по плоскости симметрии, перпендикулярной продольной оси муфты (напряжения по торцам муфты в осевом направлении равны нулю) в дальнейшем модель 2.

В качестве статических граничных условий выступают величина внутреннего давлений, приложенная к внутренней поверхности цилиндрической оболочки.

Поскольку при решении задачи 3-х мерным типом КЭ рассматривается четверть цилиндрической оболочки, то необходимо вводить дополнительные закрепления используя условия симметрии.

Геометрические характеристики толстостенной цилиндрической муфты взяты на основании данных представленных в [32]:

- Внешний радиус $r_1 = 4.38$ мм
- Внутренний радиус $r_2 = 3.11$ мм
- Длина муфты $h = 18$ мм.

На рисунке 1.1 приведена конечно-элементная модель (КЭМ) толстостенной цилиндрической муфты из СПФ. В рамках КЭМ рассматривается четверть цилиндрической оболочки с учетом симметрии задачи. В качестве статических граничных условий выступает величина внутреннего давления. Закрепление КЭМ является статически определимым в случае рассмотрения задачи в рамках модели 1. В рамках модели 2 КЭМ дополнительно закрепляется по торцам от осевых смещений. Муфта смоделирована 3-х мерным типом КЭ С3D8Н.

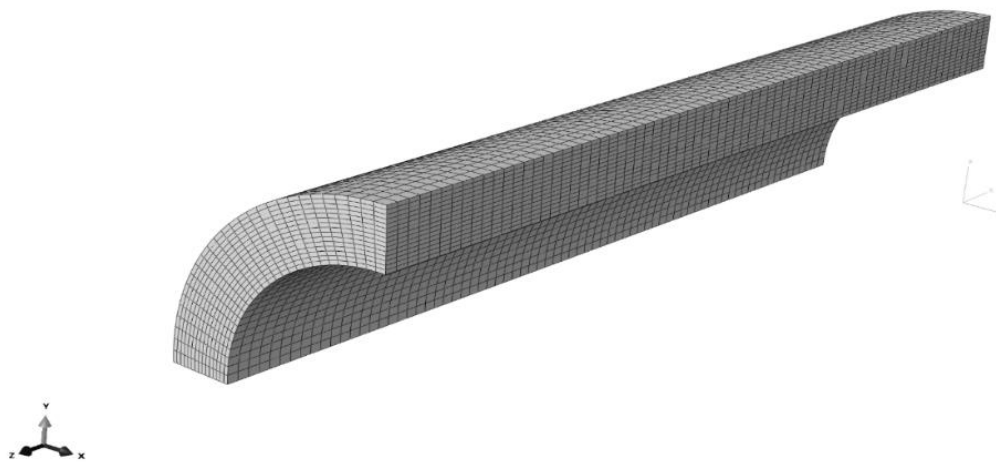


Рис. 4. КЭМ толстостенной цилиндрической муфты.

В рамках работы предлагается два принципиально новых способа увеличения внутренней поверхности муфты, основывающиеся на макро- и микро – механических термоупругих процессах, происходящих в СПФ.

- Нагружение в режиме мартенситной неупругости монотонно возрастающим внутренним давлением в состоянии хаотического мартенсита. Процесс считается изотермическим (далее – МН).
- Нагружение в процессе прямого термоупругого превращения (далее – ПП). Муфта находится под действием постоянного внутреннего давления и претерпевает охлаждение через интервал температур прямого мартенситного превращения.

В качестве сплава, используемого для проведения численного анализа, используется равноатомный NiTi, поскольку для данного материала имеется большая база экспериментальных данных необходимых для проведения численного анализа и поиска оптимального метода увеличения внутреннего радиуса муфты из СПФ [33].

Для численного моделирования нагружения в режиме МН использованы следующие значения материальных констант, для случая $\mu_\sigma = 1$ (одноосного растяжения) $\rho_D^t(\mu_\sigma) = 0.0608$, $\sigma_0^t(\mu_\sigma) = 27.4$ МПа, $\alpha^t(\mu_\sigma) = 6.45$, для случая $\mu_\sigma = -1$ (одноосного сжатия) $\rho_D^c(\mu_\sigma) = 0.02$, $\sigma_0^c(\mu_\sigma) = 18$ МПа, $\alpha^c(\mu_\sigma) = 16.08$ [33].

Для численного моделирования при нагружении в процессе ПП использованы следующие значения материальных констант: модуль Юнга асугенитной фазы $E_A = 84000$ МПа, мартенситной – $E_M = 28000$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu_A = \nu_M = 0.3$, $\Delta S = 320250$ Па/К, $M_s^0 = 313$ К, $M_f^0 = 293$ К. Для случая $\mu_\sigma = 1$ (одноосное растяжения): $\rho_D^t(\mu_\sigma) = 0.1047$, $\sigma_0^t(\mu_\sigma) = 322.6$ МПа, для случая $\mu_\sigma = -1$ (одноосное

сжатия): $\rho_D^c(\mu_\sigma) = 0.07419$, $\sigma_0^c(\mu_\sigma) = 185.7\text{МПа}$ [33]. Считается, что охлаждение оболочки происходит медленно, при этом температура однородно распределена по сечению муфты и снижается с 330 до 293 К.

4. Результаты моделирования

Ниже представлены эпюры радиальных σ_r (рис.5а,б) и кольцевых σ_θ (рис.6а,б) напряжений по сечению цилиндрической толстостенной муфты. Кривая 1 – соответствует нагружению в режиме МН, 2 – нагружению в процессе ПП. Правило расположения кривых совпадает для рис. 5 -8.

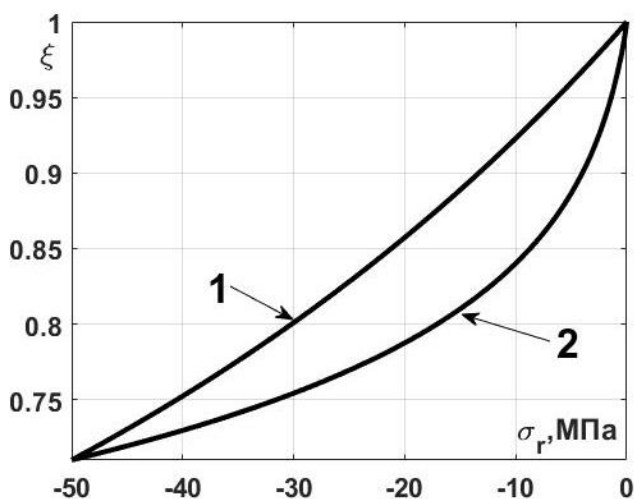


Рис.5а. Эпюра $\sigma_r - \xi$. ПДС.

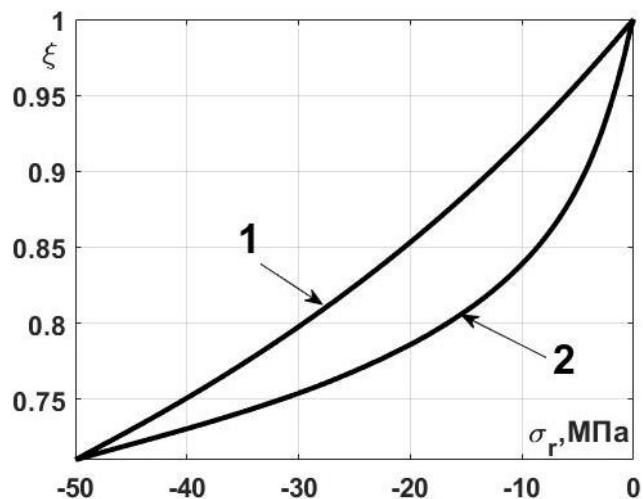


Рис.5б. Эпюра $\sigma_r - \xi$. ПНС.

На основании рис.5а.б можно заключить, что распределение σ_r по сечению муфты является нелинейным. Следует отметить, что как для модели 1, так и для модели 2 при увеличении внутреннего радиуса муфты в процессе ПП величина радиальных напряжений по всему сечению муфты меньше, нежели при нагружении в режиме МН. Выполнение граничных условий по торцам свидетельствует о правильности полученного решения.

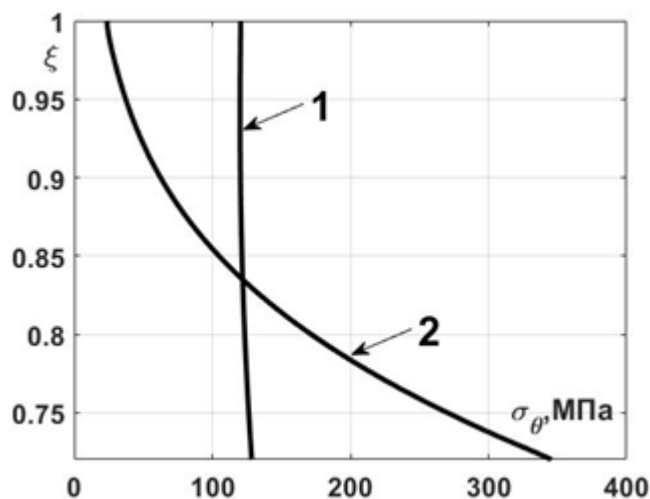


Рис.6а. Эпюра $\sigma_{\theta} - \xi$.ПДС.

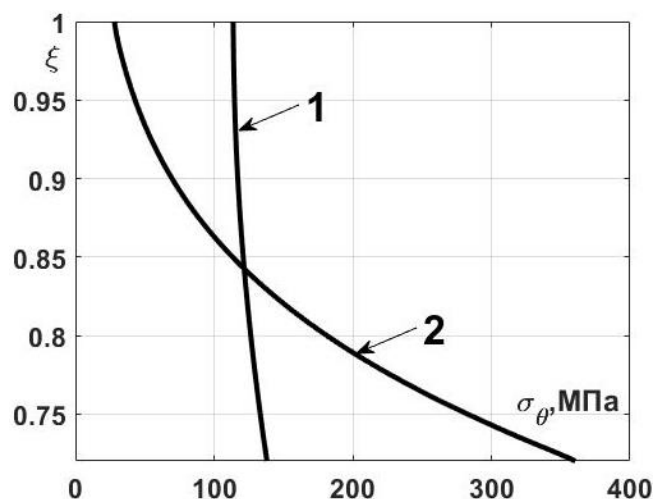


Рис.6б. Эпюра $\sigma_{\theta} - \xi$.ПНС.

Из рис. 5а,б наглядно видно, что распределение σ_{θ} по сечению оболочки, как для нагружения в режиме МН, так и в процессе ПП, является нелинейным и меняется немонотонно. Кроме того, величина максимальных окружных напряжений на внутреннем радиусе муфты при нагружении в процессе ПП в 3 раза больше, чем при нагружении в режиме МН. Однако следует учитывать, что при моделировании процесса увеличения внутреннего радиуса муфты из СПФ в процессе ПП не учитывался накопление структурных деформаций, что приводит к существенному снижению окружных напряжений. Также отметим, что в процессе ПП наблюдается резкий рост напряжений σ_{θ} в нижней половине сечения муфты и падение в верхней, как для модели 1, так и для модели 2.

На рис. 7а,б представлено распределение параметра вида напряженного состояния μ_σ по сечению оболочки.

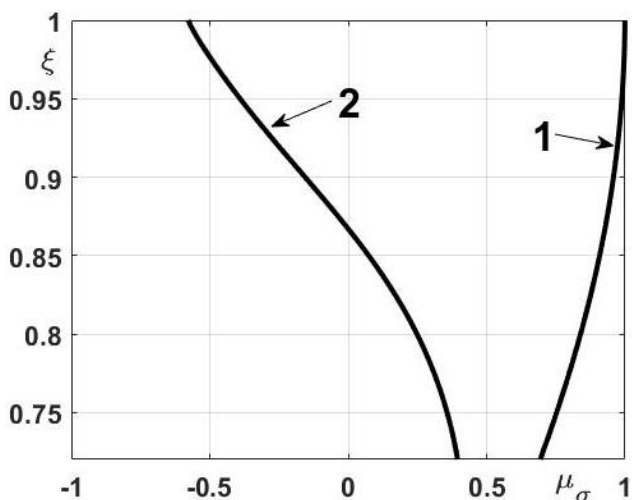


Рис.7а. Зависимость $\mu_\sigma - \xi$.ПДС.

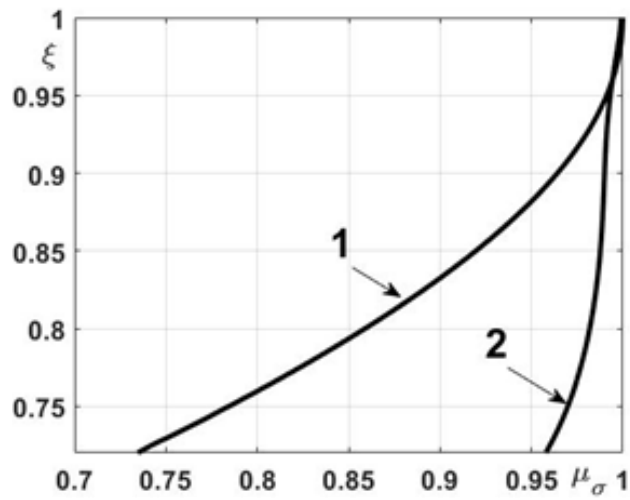


Рис.7б. Зависимость $\mu_\sigma - \xi$.ПНС.

Как видно из приведенных рисунков распределение μ_σ по сечению оболочки как для раздачи в режиме МН, так и в процессе ПП, является нелинейным и меняется немонотонно, а для нагружения в процессе ПП для модели 1 еще и знакопеременный характер. Кроме того, следует отметить, что при раздаче муфты в режиме мартенситной неупругости различия в распределении μ_σ для модели 1 и 2 практически не наблюдается, в то время, как при нагружении в процессе ПП наблюдаются существенные различия параметра вида напряженного состояния на внешнем радиусе муфты.

На рис. 8а,б представлено распределение радиальных деформаций по сечению муфты.

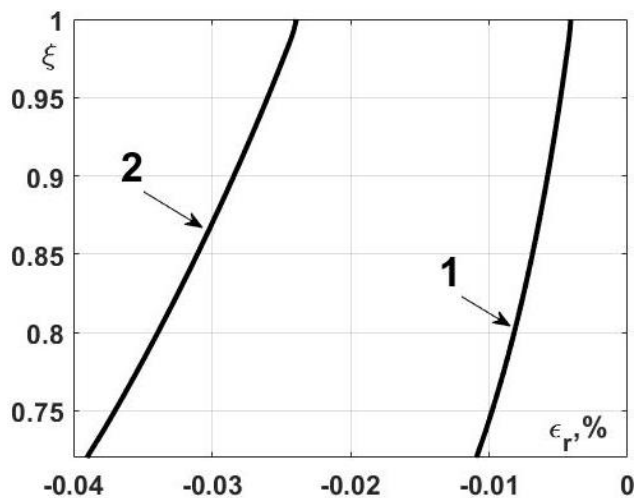


Рис. 8а Зависимость $\varepsilon_r - \xi$.ПДС.

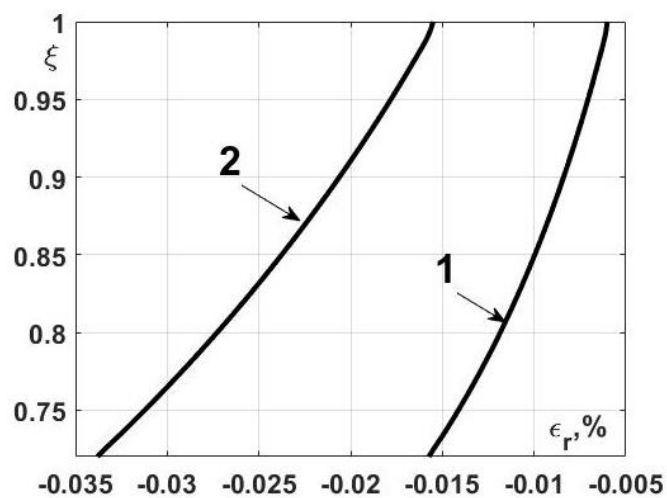


Рис. 8б Зависимость $\varepsilon_r - \xi$.ПНС.

На основании приведенных рис. 8а,б можно заключить, что накопленная радиальная деформация как для модели 1, так и для модели 2 при действии одинакового давления $P = 50$ МПа более, чем в 2 раза больше в процессе прямого термоупругого фазового превращения. Отметим, что при раздаче муфты в режиме мартенситной неупругости ε_r больше для модели 2, в то время как при раздаче муфты в процессе прямого термоупругого фазового превращения наблюдается обратная тенденция.

В следствии полученных данных можно сделать вывод, что выгоднее производить раздачу при нагружении в процессе термоупругого фазового превращения несмотря на то, что величина окружных напряжений в этом случае в несколько раз больше. Данная тенденция связана с тем, что при решении задачи о раздаче муфты в процессе прямого термоупругого превращения не учитывалось влияние структурных деформаций. Следует отметить, что величина возникающих окружных напряжений при увеличении внутреннего радиуса муфты в процессе

прямого термоупругого превращения более, чем в 3 раза меньше, чем при увеличении внутреннего радиуса муфты из СПФ в режиме мартенситной неупругости путем дорнирования.

Выводы

В рамках работы выполнено численное моделирование увеличение внутреннего радиуса толстостенной цилиндрической муфты из СПФ путем накопления неупругих деформаций в двух постановках: в режиме мартенситной неупругости и процессе прямого термоупругого фазового превращения. Решение задач получено с учетом разносопротивляемости этих сплавов растяжению-сжатию и при двух принципиально различных типах граничных условий. Проведено сравнение двух постановок и установлено, что предпочтительнее производить процесс увеличения внутреннего радиуса толстостенной цилиндрической муфты из СПФ в процессе прямого термоупругого фазового перехода.

Модель пользовательского материала разработанная в ПК Simulia Abaqus, обладают высоким уровнем доступности и может быть использованы при решении большинства технических проектов по внедрению в конструкцию ЛА элементов из СПФ, в том числе при проектировании термомеханических соединений с применением муфт из этого материала.

Список источников

1. Халов М.О. Перспективы применения сплавов с памятью на основе никелида титана в устройствах аэрокосмического назначения // Труды МАИ. 2012. № 55. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=30132>
2. Ковалевич М.В., Климова А.А. Совмещение традиционных операций листовой штамповки и пневмотермической формовки в режиме сверхпластичности для изготовления изделий авиационной техники // Труды МАИ. 2010. № 38. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=14150>
3. Лихачев В.А., Кузьмин С.Л., Каменцева З.П. Эффект памяти формы. – Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1987. - 216 с.
4. Арутюнов А.Г., Дыдышко Д.В, Ендогур А.И., Кузнецов К.В., Толмачев В.И. Перспективы развития транспортных самолетов // Труды МАИ. 2016. № 90. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=74704>
5. Смагин Д.И., Пугачев Ю.Н., Долгов О.С. К вопросу испытаний бортовых гидравлических систем и их значение при разработке современных видов воздушных судов // Труды МАИ. 2011. № 44. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=25118>
6. Низаметдинов Ф.Р., Сорокин Ф.Д., Иванников В.В. Разработка конечного элемента оболочки для моделирования больших перемещений элементов конструкций летательных аппаратов // Труды МАИ. 2019. № 109. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=111337>. DOI: [10.34759/trd-2019-109-2](https://doi.org/10.34759/trd-2019-109-2)

7. Kapgan M., Melton K. Shape memory alloy tube and pipe couplings // Proceedings of Engineering Aspects of Shape Memory Alloys, London, 1990, pp. 137-148.
8. Tabesh M., Atli K., Rohmer J., Franco B., Karaman I., Boyd J., Lagoudas D. Design of shape memory alloy pipe couplers: modeling and experiments // Proceedings of SPIE 8343, Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies, San Diego, 2012, pp. 18. DOI: [10.1117/12.915361](https://doi.org/10.1117/12.915361)
9. Lomakin E.V. Constitutive models of mechanical behavior of media with stress state dependent material properties // Advanced Structurtd Materials, 2011, vol. 7, pp. 339-350. DOI: [10.1007/978-3-642-19219-7_17](https://doi.org/10.1007/978-3-642-19219-7_17)
10. Yong Liu, Z. Xie, J. Van Humbeeckd, L. Delaey. Asymmetry of stress-strain curves under tension and compression for NiTi shape memory alloys // Acta materialia, 1998, vol. 46, no. 12, pp. 4325–4338. DOI: [10.1016/S1359-6454\(98\)00112-8](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(98)00112-8)
11. Wu D., Sun G., Wu J. The nonlinear relationship between transformation strain and applied stress for nitinol // Materials Letters, 2003, vol. 57, № 7, pp. 1334-1338. DOI: [10.1016/S0167-577X\(02\)00983-7](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(02)00983-7)
12. Машихин А.Б., Мовчан А.А. Задача о прямом мартенситном превращении в толстостенном цилиндре из сплава с памятью формы // Известия РАН. Механика твердого тела. 2016. № 3. С. 100-114.
13. Машихин А.Е., Мовчан А.А. Краевые задачи термомеханики для цилиндра и сферы из сплава с памятью формы // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2017. № 3. С. 113-128.

14. Шарунов А.В. Решение задачи о нагружении тонкостенных сферы и цилиндра из сплава с памятью формы, с учетом разносопротивляемости материала в режиме мартенситной неупругости // Механика композиционных материалов и конструкций. 2020. Т. 26. № 2. С. 174-189. DOI: [10.33113/mkmk.ras.2020.26.02.174_189.02](https://doi.org/10.33113/mkmk.ras.2020.26.02.174_189.02)
15. Nushtaev D.V., Zhavoronok S.I. Dynamics of martensite phase transitions in shape memory beams under buckling and postbuckling conditions // IFAC, 2018, vol. 51, no. 2, pp. 873-878.
16. Nushtaev D.V., Zhavoronok S.I. Abnormal buckling of thin-walled bodies with shape memory effects under thermally induced phase transitions / In: Recent Developments in the Theory of Shells. Advanced Structured Materials, Berlin, Springer, 2019, vol. 110, pp. 227-250. DOI: [10.1007/978-3-030-17747-8_26](https://doi.org/10.1007/978-3-030-17747-8_26)
17. Ruiz-Pinilla J., Montoya-Coronado L., Ribas C., Cladera A. Finite element modeling of RC beams externally strengthened with iron-based shape memory alloy (Fe-SMA) strips, including analytical stress-strain curves for Fe-SMA // Engineering Structures, 2020, vol. 223, no. 15. DOI: [10.1016/j.engstruct.2020.111152](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111152)
18. Saleeb A., Natsheh S., Owusu-Danquah J. Efficiency of finite element analyses of 55NiTi SMA actuators: Solid versus beam and shell modeling // Finite Elements in Analysis and Design, 2017, vol. 136. pp. 58-69. DOI: [10.1016/j.finel.2017.07.011](https://doi.org/10.1016/j.finel.2017.07.011)
19. Porenta L., Lavrencic M., Dujc J., Brojan M., Tusek J. Modeling large deformations of thin-walled SMA Structures by shell finite elements // Communications in Nonlinear

Science and Numerical Simulation, 2021, vol. 101, no. 55. DOI: [10.1016/j.cnsns.2021.105897](https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2021.105897)

20. Zhou B., Kang Z., Wang Z., Xue S. Finite element method on shape memory alloy structure and its applications // Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2019, vol. 32, DOI: [10.1186/s10033-019-0401-3](https://doi.org/10.1186/s10033-019-0401-3)

21. Ho H., Choi E., Park S. Investigating stress distribution of crimped SMA fibers during pullout behavior using experimental testing and a finite element model // Composite Structures, 2021, vol. 272. DOI: [10.1016/j.compstruct.2021.114254](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114254)

22. Xolin P., Collard C., Engels-Deutsch M., Zineb T. Finite element and experimental structural analysis of endodontic rotary file made of Cu-based single crystal SMA considering a micromechanical behavior model // International Journal of Solids Structures, 2021, vol. 221. DOI: [10.1016/j.ijsolstr.2021.01.015](https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2021.01.015)

23. Мовчан А.А., Мовчан И.А., Сильченко Л.Г. Микромеханическая модель нелинейного деформирования сплавов с памятью формы при фазовых и структурных превращениях // Известия РАН. Механика твердого тела. 2010. № 3. С. 118–130.

24. Мовчан А.А., Сильченко Л.Г., Сильченко Т.Л. Учет явления мартенситной неупругости при обратном фазовом превращении в сплавах с памятью формы // Известия РАН. Механика твердого тела. 2011. № 2. С. 44–56.

25. Мишустин И.В., Мовчан А.А. Моделирование фазовых и структурных превращений в сплавах с памятью формы, происходящих под действием

немонотонно меняющихся напряжений // Известия РАН. Механика твердого тела. 2014. № 1. С. 37–53.

26. Мишустин И.В., Мовчан А.А. Аналог теории пластического течения для описания деформации мартенситной неупругости в сплавах с памятью формы // Известия РАН. Механика твердого тела. 2015. № 2. С. 78–95.

27. Мовчан А.А. Определяющие соотношения модели нелинейного деформирования сплавов с памятью формы, разрешенные относительно приращений напряжений // Механика композиционных материалов и конструкций. 2021. Т. 27. № 3. С. 343-359.

28. Boyd J.G., Lagoudas D.C. A thermodynamical constitutive model for shape memory materials. Part I. The monolithic shape memory alloy // International Journal of Plasticity, 1996, vol. 12, no. 6, pp. 805-842. DOI: [10.1016/S0020-7683\(01\)00152-4](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(01)00152-4)

29. Arghavani J., Auricchio F., Naghdabadi R., Relai A., Sohrabpour S. A 3-D phenomenological constitutive model for shape memory alloys under multiaxial loadings // International Journal of Plasticity, 2010, vol. 26, no. 7, pp. 976-991. DOI: [10.1016/j.ijplas.2009.12.003](https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2009.12.003)

30. Саганов Е.Б., Шарунов А.В. Решение задачи о сфере из сплава с памятью формы, находящейся под действием постоянного давления, с учетом разносопротивляемости материала // Механика композиционных материалов и конструкций. 2020. Т. 26. № 1. С. 108-121.

31. Саганов Е.Б. Численное моделирование прямого мартенситного превращения в сплавах с памятью формы с учетом их разносопротивляемости // Механика композиционных материалов и конструкций. 2021. Т. 27. № 4. С. 511-522.
32. Aerofit, Inc APT Laboratory, 1968-2004. URL: www.aerofit.com
33. Мовчан А.А., Казарина С.А., Сильченко А.Л. Экспериментальная идентификация модели нелинейного деформирования сплавов с памятью формы при фазовых и структурных превращениях // Деформация и разрушение материалов. 2018. № 12. С. 2-11.

References

1. Khalov M.O. *Trudy MAI*, 2012, no. 55. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=30132>
2. Kovalevich M.V., Klimova A.A. *Trudy MAI*, 2010, no. 38. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=14150>
3. Likhachev V.A., Kuz'min S.L., Kamentseva Z.P. *Effekt pamyati formy*. (Shape memory effect), Leningrad, Izd-vo Leningradskogo universiteta, 1987, 216 p.
4. Arutyunov A.G., Dydyshko D.V, Endogur A.I., Kuznetsov K.V., Tolmachev V.I. *Trudy MAI*, 2016, no. 90. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=74704>
5. Smagin D.I., Pugachev Yu.N., Dolgov O.S. *Trudy MAI*, 2011, no. 44. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=25118>
6. Nizametdinov F.R., Sorokin F.D., Ivannikov V.V. *Trudy MAI*, 2019, no. 109. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=111337>. DOI: [10.34759/trd-2019-109-2](https://doi.org/10.34759/trd-2019-109-2)

7. Kapgan M., Melton K. Shape memory alloy tube and pipe couplings, *Proceedings of Engineering Aspects of Shape Memory Alloys*, London, 1990, pp. 137-148.
8. Tabesh M., Atli K., Rohmer J., Franco B., Karaman I., Boyd J., Lagoudas D. Design of shape memory alloy pipe couplers: modeling and experiments, *Proceedings of SPIE 8343, Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies*, San Diego, 2012, pp. 18. DOI: [10.1117/12.915361](https://doi.org/10.1117/12.915361)
9. Lomakin E.V. Constitutive models of mechanical behavior of media with stress state dependent material properties, *Advanced Structurtd Materials*, 2011, vol. 7, pp. 339-350. DOI: [10.1007/978-3-642-19219-7_17](https://doi.org/10.1007/978-3-642-19219-7_17)
10. Yong Liu, Z. Xie, J. Van Humbeeckd, L. Delaey. Asymmetry of stress-strain curves under tension and compression for NiTi shape memory alloys, *Acta materialia*, 1998, vol. 46, no. 12, pp. 4325–4338. DOI: [10.1016/S1359-6454\(98\)00112-8](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(98)00112-8)
11. Wu D., Sun G., Wu J. The nonlinear relationship between transformation strain and applied stress for nitinol, *Materials Letters*, 2003, vol. 57, № 7, pp. 1334-1338. DOI: [10.1016/S0167-577X\(02\)00983-7](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(02)00983-7)
12. Mashikhin A.B., Movchan A.A. *Izvestiya RAN. Mekhanika tverdogo tela*, 2016, no. 3, pp. 100-114.
13. Mashikhin A.E., Movchan A.A. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika*. 2017, no. 3, pp. 113-128.
14. Sharunov A.V. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruktsii*, 2020, vol. 26, no. 2, pp. 174-189. DOI: [10.33113/mkmk.ras.2020.26.02.174_189.02](https://doi.org/10.33113/mkmk.ras.2020.26.02.174_189.02)

15. Nushtaev D.V., Zhavoronok S.I. Dynamics of martensite phase transitions in shape memory beams under buckling and postbuckling conditions, *IFAC*, 2018, vol. 51, no. 2, pp. 873-878.
16. Nushtaev D.V., Zhavoronok S.I. *Abnormal buckling of thin-walled bodies with shape memory effects under thermally induced phase transitions*. In: Recent Developments in the Theory of Shells. Advanced Structured Materials, Berlin, Springer, 2019, vol. 110, pp. 227-250. DOI: [10.1007/978-3-030-17747-8_26](https://doi.org/10.1007/978-3-030-17747-8_26)
17. Ruiz-Pinilla J., Montoya-Coronado L., Ribas C., Cladera A. Finite element modeling of RC beams externally strengthened with iron-based shape memory alloy (Fe-SMA) strips, including analytical stress-strain curves for Fe-SMA, *Engineering Structures*, 2020, vol. 223, no. 15. DOI: [10.1016/j.engstruct.2020.111152](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111152)
18. Saleeb A., Natsheh S., Owusu-Danquah J. Efficiency of finite element analyses of 55NiTi SMA actuators: Solid versus beam and shell modeling, *Finite Elements in Analysis and Design*, 2017, vol. 136. pp. 58-69. DOI: [10.1016/j.finel.2017.07.011](https://doi.org/10.1016/j.finel.2017.07.011)
19. Porenta L., Lavrencic M., Dujc J., Brojan M., Tusek J. Modeling large deformations of thin-walled SMA Structures by shell finite elements, *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2021, vol. 101, no. 55. DOI: [10.1016/j.cnsns.2021.105897](https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2021.105897)
20. Zhou B., Kang Z., Wang Z., Xue S. Finite element method on shape memory alloy structure and its applications, *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2019, vol. 32, DOI: [10.1186/s10033-019-0401-3](https://doi.org/10.1186/s10033-019-0401-3)

21. Ho H., Choi E., Park S. Investigating stress distribution of crimped SMA fibers during pullout behavior using experimental testing and a finite element model, *Composite Structures*, 2021, vol. 272. DOI: [10.1016/j.compstruct.2021.114254](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114254)
22. Xolin P., Collard C., Engels-Deutsch M., Zineb T. Finite element and experimental structural analysis of endodontic rotary file made of Cu-based single crystal SMA considering a micromechanical behavior model, *International Journal of Solids Structures*, 2021, vol. 221. DOI: [10.1016/j.ijsolstr.2021.01.015](https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2021.01.015)
23. Movchan A.A., Movchan I.A., Sil'chenko L.G. *Izvestiya RAN. Mekhanika tverdogo tela*, 2010, no. 3, pp. 118–130.
24. Movchan A.A., Sil'chenko L.G., Sil'chenko T.L. *Izvestiya RAN. Mekhanika tverdogo tela*, 2011, no. 2, pp. 44–56.
25. Mishustin I.V., Movchan A.A. *Izvestiya RAN. Mekhanika tverdogo tela*, 2014, no. 1, pp. 37–53.
26. Mishustin I.V., Movchan A.A. *Izvestiya RAN. Mekhanika tverdogo tela*, 2015, no. 2, pp. 78–95.
27. Movchan A.A. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksii*, 2021, vol. 27, no. 3, pp. 343-359.
28. Boyd J.G., Lagoudas D.C. A thermodynamical constitutive model for shape memory materials. Part I. The monolithic shape memory alloy, *International Journal of Plasticity*, 1996, vol. 12, no. 6, pp. 805-842. DOI: [10.1016/S0020-7683\(01\)00152-4](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(01)00152-4)
29. Arghavani J., Auricchio F., Naghdabadi R., Relai A., Sohrabpour S. A 3-D phenomenological constitutive model for shape memory alloys under multiaxial loadings,

International Journal of Plasticity, 2010, vol. 26, no. 7, pp. 976-991. DOI: [10.1016/j.ijplas.2009.12.003](https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2009.12.003)

30. Saganov E.B., Sharunov A.V. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruktsii*, 2020, vol. 26, no. 1, pp. 108-121.

31. Saganov E.B. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruktsii*, 2021, vol. 27, no. 4, pp. 511-522.

32. *Aerofit, Inc APT Laboratory, 1968-2004*. URL: www.aerofit.com

33. Movchan A.A., Kazarina S.A., Sil'chenko A.L. *Deformatsiya i razrushenie materialov*, 2018, no. 12, pp. 2-11.

Статья поступила в редакцию 18.11.2023

Одобрена после рецензирования 21.11.2023

Принята к публикации 25.12.2023

The article was submitted on 18.11.2023; approved after reviewing on 21.11.2023; accepted for publication on 25.12.2023