

Труды МАИ. 2024. № 134
Trudy MAI, 2024, no. 134

Научная статья

УДК 539.4

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=178461>

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ТОЛСТОСТЕННОЙ МУФТЫ ИЗ СПЛАВА С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ

Алексей Валерьевич Шарунов

ПАО ОАК – «ОКБ Сухого»,

Москва, Россия

aleksej-sharunov@yandex.ru

Аннотация. Работа посвящена численному моделированию процесса предварительного деформирования (раздача - увеличение внутреннего радиуса) толстостенной цилиндрической муфты из сплава с памятью формы (СПФ) постоянным давлением в процессе прямого термоупругого фазового превращения. В рамках задачи рассматривается процесс накопления, упругих, фазовых и структурных деформаций при охлаждении муфты из СПФ через интервал температур прямого мартенситного превращения.

В рамках работы был произведен процесс интеграции модели нелинейного деформирования при фазовых и структурных превращениях в конечно – элементный комплекс Simulia Abaqus посредством процедуры создания пользовательского материала по технологии UMAT и явного определения касательной матрицы

жесткости. Процесс предварительного деформирования толстостенной цилиндрической муфты из СПФ рассматривается в однократно связанной термомеханической постановке, с учетом влияния действующего напряжения на величины температур фазового перехода.

В работе показано влияние учета структурного перехода в процессе прямого термоупругого фазового перехода для двух типов граничных условий. 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 краевых задач механики СПФ.

Результаты представленные в работе, могут быть использованы при проектировании термомеханических соединительных муфт из СПФ.

Ключевые слова: сплавы с памятью формы, Simulia Abaqus, толстостенная цилиндрическая муфта, термоупругий фазовый переход, структурные деформации, фазовые деформации

Для цитирования: Шарунов А.В. Численное моделирование процесса предварительного деформирования толстостенной муфты из сплава с памятью формы // Труды МАИ. 2024. № 134. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=178461>

Original article

NUMERICAL SIMULATION OF THE PREFORMING PROCESS OF A THICK-WALLED COUPLING MADE OF SHAPE MEMORY ALLOYS

Alexey V. Sharunov

PJSC UAC Sukhoi Design Bureau,

Moscow, Russia

aleksej-sharunov@yandex.ru

Abstract. The work deals with the numerical modeling of the pre-deformation process (distribution - increase in the inner radius) of a thick-walled cylindrical coupling made of shape memory alloy (SMA) with the constant pressure in the process of direct thermoelastic phase transformation. The process of elastic, phase and structural deformations accumulation while the SMA coupling cooling through the temperature range of direct martensitic transformation was considered within the framework of the problem.

As part of the work, the process of model integrating of the nonlinear deformation during phase and structural transformations into the finite element complex Simulia Abaqus was performed through the procedure for creating custom material using UMAT technology and explicitly determining the tangent stiffness matrix. The pre-deformation process of a thick-walled cylindrical coupling made of SMA is being considered in a once-cohesive thermomechanical formulation, with account for the effect of the acting stress on the of phase transition temperature values.

The article demonstrates the effect of accounting for the structural transition in the process of a direct thermoelastic phase transition for two types of boundary conditions. Fidelity 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 employing known analytical solutions to the boundary value problems of the SMA mechanics.

The results presented in the article may be employed in the design of thermomechanical joint couplings from the SMA.

Keywords: shape memory alloys, Simulia Abaqus, thick-walled cylindrical coupling, thermoelastic phase transition, structural deformations, phase deformations

For citation: Sharunov A.V. Numerical simulation of the preforming process of a thick-walled coupling made of shape memory alloys. *Trudy MAI*, 2024, no. 134. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=178461>

1. Введение

Высокие темпы развития современной авиационной промышленности, подталкивают инженеров к применению новых материалов и методик в процессе проектирования перспективных авиационных комплексов [1-4]. Особое внимание уделяется созданию и практическому применению в различных отраслях промышленности «умных» или функциональных материалов, обладающих способностью изменять физические свойства (механические, электромагнитные и т.д.) вследствие изменения температуры, механических напряжений, напряженности

электромагнитного поля и других параметров. К числу таких материалов относятся сплавы с памятью формы [5], обладающие уникальными термомеханическими свойствами, возникающими в следствии происходящих в них твердотельных фазовых переходов.

В рамках данной работы рассматривается одно из самых перспективных применений СПФ в авиационной промышленности - муфтовые термомеханические соединения (ТМС) трубопроводов [6,7]. Данные соединения нашли широкое применение в гидравлических системах ЛА таких зарубежных фирм, как Grumman Corporation, Airbus, Boeing [8]. В отечественной авиации проводились попытки внедрения данных сплавов в ОКБ «Сухого», ОКБ «Туполева», ОКБ «Микояна». Однако, широкого применения на практике они не нашли в виду наличия ряда проблем, из которых оказались критичными: отсутствие доступного математического аппарата для проведения проектировочных расчетов муфт с учетом уникальных свойств активных материалов и сложности технологического процесса создания муфт. Кроме того, следует отметить, что муфтовые соединения из СПФ необходимо изготавливать из сплавов системы Ti-Ni-Fe или Ti-Ni-Nb имеющих широкую петлю мартенситного гистерезиса и способных функционировать при криогенных температурах [9-15].

Одним из самых важных вопросов при проектировании ТМС трубопроводов из СПФ является способ предварительного деформирования изготавливаемого изделия. Используемый в настоящее время процесс дорнирования (механического наведения деформаций) приводит к механическим повреждениям внутренней

функциональной поверхности муфты, кратно снижая ее надежность. В данной работе рассматривается процесс предварительного деформирования изготавливаемого соединения при помощи явления накопления неупругих деформаций (фазовых и структурных) прямого мартенситного превращения.

Известны работы [16-18] в которых проведен анализ НДС подобных конструкций из СПФ. Однако в работе [16] муфта из СПФ считается тонкостенной и не учитывает неоднородность распределения НДС по сечению оболочки. В работах [17,18] не учитывается влияние разнсопротивляемости СПФ [19] на НДС, а также влияние действующих напряжений на температуры фазовых переходов [20]. Подобная постановка задачи требует проведения анализа НДС муфты (толстостенной цилиндрической оболочки) из СПФ в однократно связанной термомеханической постановке, под действием постоянного внутреннего давления, с учетом разнсопротивляемости СПФ и влияния действующего напряжения на температуры фазовых переходов.

Проведение подобных расчетов аналитическими методами является весьма затруднительным, поэтому в данной работе предлагается использовать хорошо зарекомендовавший себя в последнее время метод конечных элементов. В работах [21-25] проводится анализ различных конструкций из СПФ с использованием метода конечных элементов. Однако в каждой из них не учитывается одно или несколько из вышеперечисленных свойств СПФ.

В рамках данной работы произведена интеграция модели нелинейного деформирования при фазовых и структурных превращениях [26-29] в программный

комплекс (ПК) Simulia Abaqus посредством процедуры создания пользовательского материала по технологии UMAT и явного определения касательной матрицы жесткости. Использование данной модели позволяет учесть разностойчивость этих сплавов, а также проводить связанный неизотермический анализ НДС конструкций из СПФ.

В ходе работы было получено решение задачи раздачи толстостенной цилиндрической муфты из СПФ, находящейся под действием постоянного внутреннего давления и претерпевающей охлаждение через интервал температур прямого мартенситного превращения. Решение задач получено для двух типов граничных условий в осесимметричной постановке. моделирование происходит конечными элементами типа C3X4H [30].

2. Разрешающие соотношения, реализованные в ПК Simulia Abaqus

В работе [31] приведены определяющие соотношения модели нелинейного деформирования СПФ при фазовых и структурных превращениях, разрешенные относительно напряжений.

Выражения приращений компонент напряжений через компоненты деформаций для случая прямого превращения, сопровождающегося структурным переходом:

$$d\sigma'_{ij} = 2G(q) [d\varepsilon'_{ij} - A_{ij}^+ dq - B_{ij} d\sigma_i] \quad (1)$$

$$d\sigma_{kk} = K(q) [d\varepsilon_{kk} - 3Bdq] \quad (2)$$

$$A_{ij}^+ = \sigma'_{ij} \left(\frac{\Delta G}{2G_A G_M} + \frac{3}{2} \frac{\rho_{D1} \varphi_1}{\sigma_i} \right), \quad B_{ij} = \frac{3}{2} \rho_{D2} \frac{\sigma'_{ij}}{\sigma_i} q \varphi_2, \quad B = \frac{\Delta K \sigma_{kk}}{3K_A K_M},$$

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

$$\varphi_1 = 1 - \exp(-\sigma_i / \sigma_0), \quad \varphi_2 = 1 - \exp(-\sigma_i / \sigma_0)^\alpha$$

Здесь $d\varepsilon'_{ij}$ – приращение девиатора деформаций, $d\varepsilon_{kk}$ – приращение шаровой части тензора деформаций, $G(q)$, $K(q)$ – модуль сдвига и утроенный объемный модуль, ρ_{D1}, ρ_{D2} – верхняя граница интенсивности фазовых и структурных деформаций соответственно, q – объемная доля мартенситной фазы, нижний индекс A, M соответствует значению модулей в аустенитной или мартенситной фазе соответственно, φ_1, φ_2 – материальная функция, определяющая форму диаграммы прямого превращения и мартенситной неупругости соответственно.

Приращение объемной доли мартенситной фазы:

$$dq = m dt^+ + p d\varepsilon_{kk} + n d\sigma_i \quad (3)$$

$$dt^+ = \frac{-dT}{M_s^0 - M_f^0}, \quad m = M / R, \quad n = N / R, \quad p = PK(q) / R, \quad N = Mf_1(\sigma_i),$$

$$P = Mf_2(\sigma_{kk}), \quad M = \pi \sqrt{q(1-q)}, \quad R = 1 + 3K(q)MB^2 / [\Delta S(M_s^0 - M_f^0)],$$

$$f_1 = \frac{\rho_{D1}(\varphi_1 + \sigma_i \varphi_1') + \Delta G \sigma_i / (3G_A G_M)}{\Delta S(M_s^0 - M_f^0)}, \quad f_2(\sigma_{kk}) = \frac{B}{\Delta S(M_s^0 - M_f^0)},$$

Где ΔS – скачек объемной плотности энтропии при переходе от мартенситной фазы к аустенитной, dT – приращение температуры, M_s^0 , M_f^0 – температуры начала и окончания прямого мартенситного превращения в отсутствии напряжений.

Приращение интенсивности напряжений:

$$d\sigma_i = \frac{3G(q)(\sigma'_{ij}d\varepsilon'_{ij} - mf_3dt^+ - pf_3d\varepsilon_{kk})}{\sigma_i + 3G(mf_5 + f_4)} \quad (4)$$

$$f_3 = \frac{\Delta G \sigma_i^2}{3G_A G_M} + \rho_D \sigma_i \varphi_1, \quad f_4 = \sigma'_{ij} B_{ij} = \rho_{D2} \sigma_i q \varphi_2, \quad f_5 = f_1 f_3$$

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

Температура начала фазового перехода при действии напряжений:

$$M_s^\sigma = M_s^0 + \frac{\rho_D \varphi_1 \sigma_i}{\Delta S} \quad (5)$$

Для учета разносопротивляемости СПФ используется линейная зависимость материальных констант ρ_d, σ_0, α от параметра вида напряженного состояния μ_σ .

Параметр вида напряженного состояния определяется по формуле [20 статья саганов]:

$$\mu_\sigma = \frac{27 J_3}{2 \sigma_i^3}. \quad (6)$$

где J_3 – третий инвариант девиатора напряжений.

На основе соотношений (1)-(6) разработана пользовательская модель материала, позволяющая проводить численное моделирование прямого мартенситного превращения в СПФ с учетом структурного перехода.

3. Постановка задачи

В ходе работы рассмотрена задача раздачи толстостенной цилиндрической оболочки (муфты) из СПФ. Решение задачи ведется в цилиндрической системе координат $r - \theta - z$ в осесимметричной постановке.

При решении задачи рассматривается следующий термомеханический процесс:

1. Происходит упругое деформирование толстостенной цилиндрической оболочки из СПФ внутренним давлением в высокотемпературном аустенитном фазовом состоянии. Значение достигнутого давления фиксируется.
2. Происходит охлаждение муфты через интервал температур прямого термоупругого мартенситного превращения. Происходит накопление :
 - Упругих деформаций, возникающих за счет изменения модуля Юнга при переходе от аустенитной к мартенситной фазе.
 - Неупругих фазовых деформаций возникающих за счет происходящего термоупругого фазового перехода.
 - Неупругих структурных деформаций возникающих за счет зарождения и развития мартенситных ячеек. Для накопления структурных деформаций необходимо выполнение следующих условий $d\sigma_i > 0$, $\sigma_i = \sigma_i^{\max}$.

Геометрические параметры толстостенной цилиндрической оболочки:

- Внешний радиус $r_1 = 10$ мм
- Внутренний радиус $r_2 = 5$ мм
- Длина муфты $h = 30$ мм.

При решении задачи принято, что температура цилиндрической оболочки медленно снижается с 336 до 293 К и однородно распределена по сечению толстостенной цилиндрической оболочки.

В качестве статических граничных условий выступает величина внутреннего давления $P = 50 \text{ МПа}$.

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.

Поскольку задача рассматривается в осесимметричной постановке, то вводятся дополнительные закрепления используя условия симметрии.

Температура однородно распределена по сечению толстостенной цилиндрической муфты. Решение задачи получено с учетом влияния действующих напряжений на характерные температуры фазовых переходов. Расчетная схема рассматриваемой задачи представлена на рис.1.

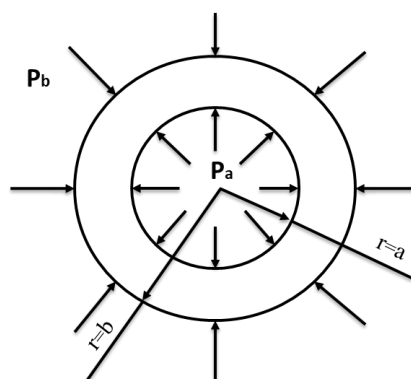


Рис.1. Расчетная схема задачи.

На рис.2 представлена конечно-элементная модель (КЭМ) толстостенной цилиндрической муфты из СПФ, смоделированная 2-х мерным осесимметричным типом КЭ СЗХ4Н [1 статья сфера], цифрами отмечены точки замера, перемещения,

напряжений, деформаций и внутренних переменных состояния. Точка 1 соответствует внешнему радиусу, 2 – середине сечения, 3 – внутреннему радиусу оболочки.

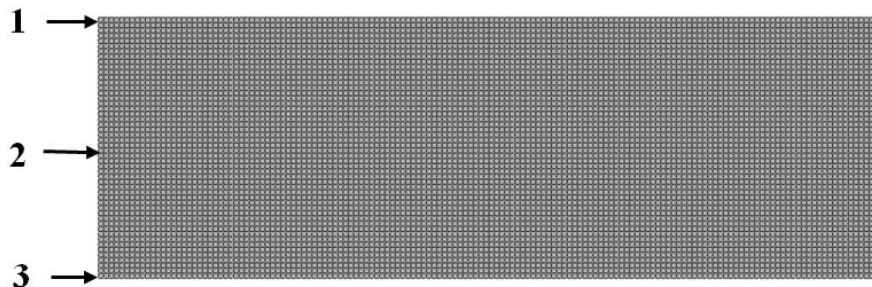


Рис.2 КЭМ толстостенной цилиндрической муфты, смоделированной плоскими осесимметричными КЭ.

При проведении численного анализа используется равноатомный NiTi имеющий следующие значения материальных констант: модуль Юнга аустенитной фазы $E_A=84000$ МПа, мартенситной $E_M=28000$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu_A=\nu_M=0.3$, $\Delta S=0.32$ МПа/К, $M_s^0=313$ К, $M_f^0=293$ К [19].

Поскольку при решении задачи предполагается линейная зависимость для параметра вида напряженного состояния, то значения материальных констант берутся для двух случаев:

$\mu_\sigma = 1$ (одноосное растяжения):

1. $F_1(\sigma_i): \rho_D^i(\mu_\sigma)=0.1047, \sigma_0^i(\mu_\sigma)=322.6$ МПа [19].
2. $F_2(\sigma_i): \rho_D^i(\mu_\sigma) = 0.0608, \sigma_0^i(\mu_\sigma) = 27.4$ МПа, $\alpha^i(\mu_\sigma) = 6.45$ [19].

$\mu_\sigma = -1$ (одноосное сжатия):

1. $F_1(\sigma_i): \rho_D^c(\mu_\sigma)=0,07419, \sigma_0^c(\mu_\sigma)=185,7$ Мпа [19].
2. $F_2(\sigma_i): \rho_D^c(\mu_\sigma) = 0.02, \sigma_0^c(\mu_\sigma) = 18$ МПа, $\alpha^c(\mu_\sigma) = 16.08$ [19].

4. Результаты моделирования

На рис. 3 а,б и 4 а,б представлены модули значений радиальных деформаций и смещений, отнесенных к радиальной координате соответствующих точек $\varepsilon_\phi = u/r$ от текущей температуры муфты из СПФ. Нумерация кривых соответствует нумерации представленной на рис.2. Сплошная линия соответствует решению рассматриваемой задачи, пунктирная линия – решению аналогичной задачи, но без учета структурного перехода.

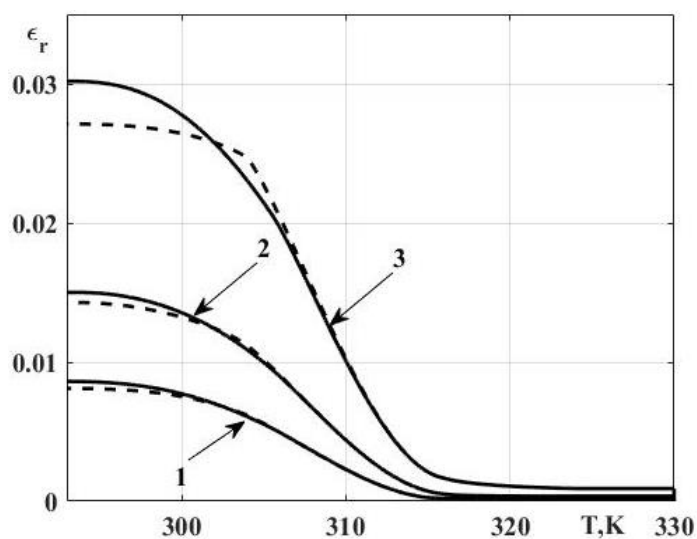


Рис.3а Зависимости $\varepsilon_r - T$. Модель 1.

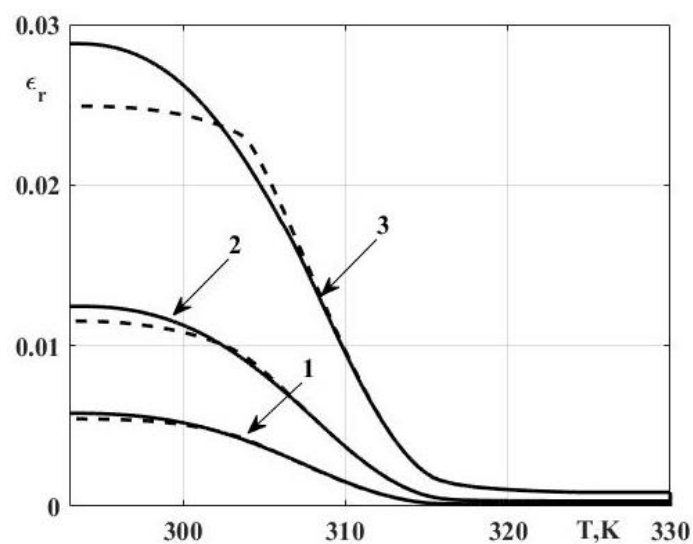


Рис3б Зависимости $\varepsilon_r - T$. Модель 2.

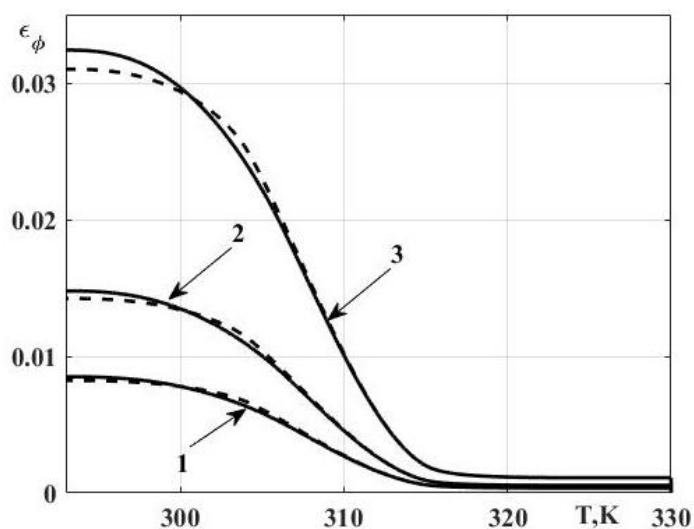


Рис.4а Зависимости $\varepsilon_\phi - T$. Модель 1.

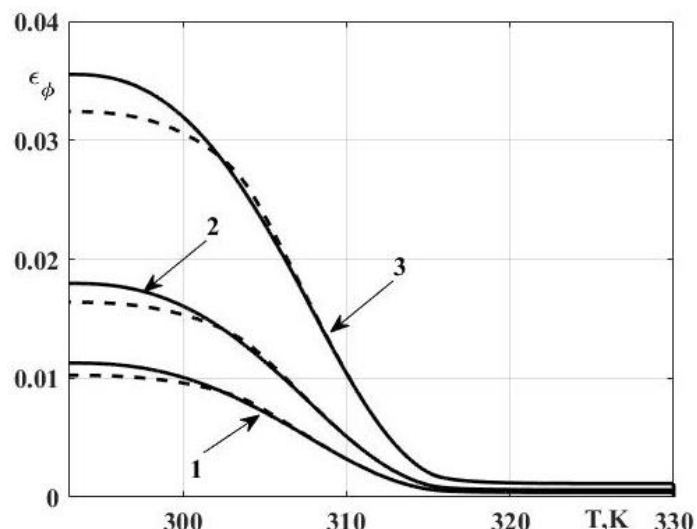


Рис.4б. Зависимости $\varepsilon_\phi - T$. Модель 2.

Согласно приведенным рисункам в процессе прямого превращения во всех точках сечения наблюдается существенный рост модулей значений радиальных деформаций и смещений, особенно на внутреннем радиусе оболочки (кривые 3). Учет структурного перехода приводит к дополнительному росту деформаций и смещений, причем для обеих моделей более значительное влияние для радиальных деформаций, чем для радиальных смещений.

На рис. 5 а,б и 6 а,б приведены эпюры радиальных σ_r и кольцевых σ_θ напряжений соответственно. Здесь $\xi = r/b$ – безразмерный радиус оболочки. Кривые 1 соответствует упругому решению задачи (материал оболочки находится в аустенитном фазовом состоянии), кривые 2 – этапу охлаждения в тот момент, когда фронт начала фазового перехода достиг внешней поверхности муфты, кривые 3 – этапу охлаждения, когда все сечение оболочки перешло в мартенситную фазу и прямое превращение завершено, точки – аналитическому решению для упругого поведения.

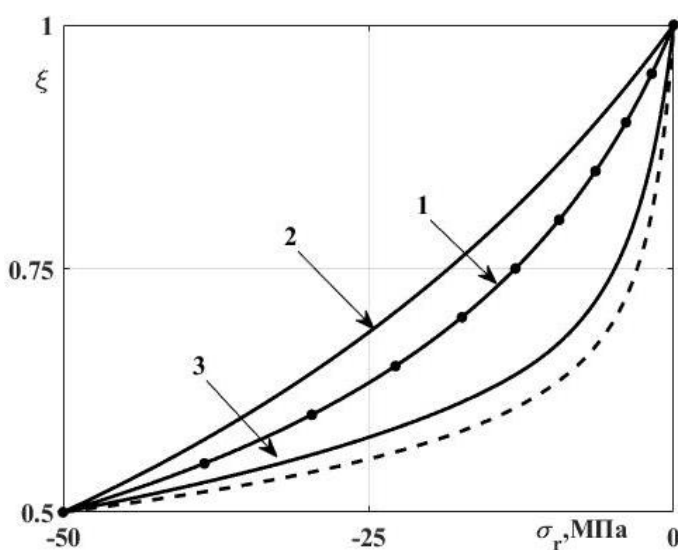


Рис.5а Эпюры $\sigma_r - \xi$. Модель 1.

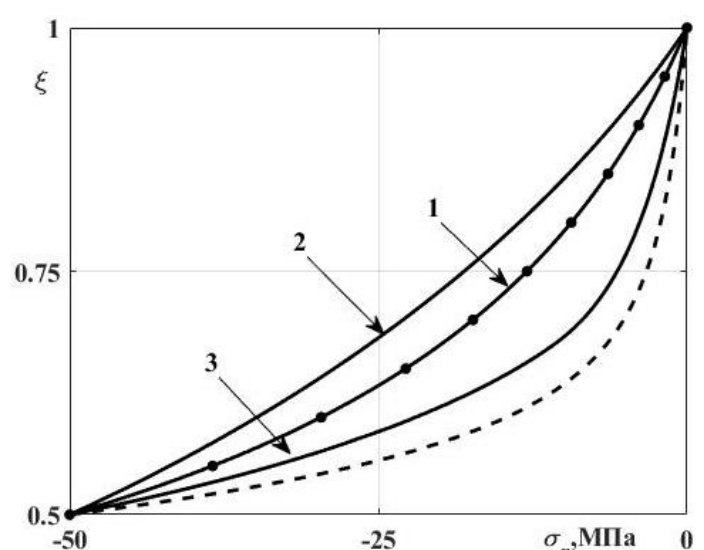


Рис.5.б Эпюры $\sigma_\theta - \xi$. Модель 2.

Из рис.5 а,б видно, что распределение радиальных напряжения на всех этапах фазового перехода является монотонным и нелинейным. Упругое решение, полученное численным моделированием, хорошо согласуется с аналогичным решением полученным аналитическим путем. На первом этапе процесса фазового перехода от его начала (кривая 1) и до выхода фронта фазового превращения на внешнюю границу муфты из СПФ (кривая 2) наблюдается рост $|\sigma_r|$ в каждой точке сечение. На втором этапе фазового перехода, от выхода фронта начала превращения на внешнюю поверхность (кривая 2) и до момента окончания фазового перехода во всем сечении муфты из СПФ (кривая 3), величина $|\sigma_r|$ уменьшается по сравнению с упругим решением. В случае не учета структурного перехода эта последняя тенденция усиливается.

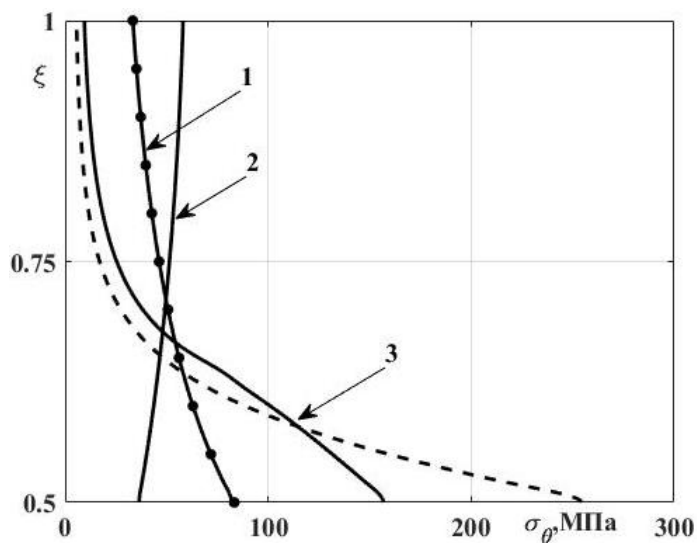


Рис.6а Эпюры $\sigma_\theta - \xi$. Модель 1.

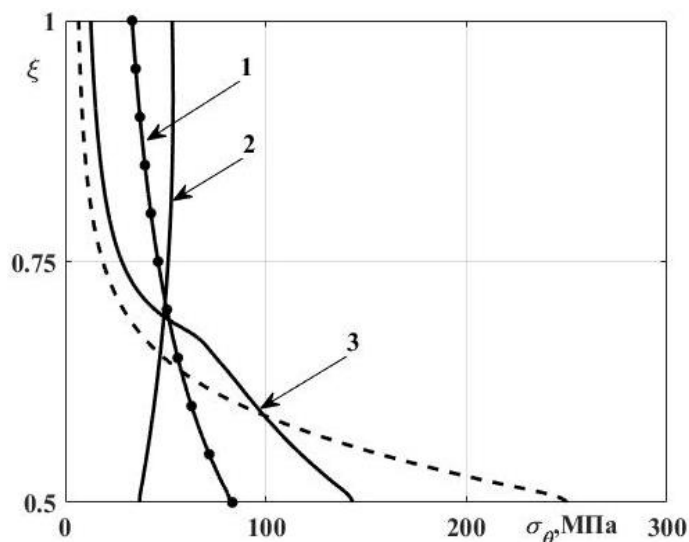


Рис.6б Эпюры $\sigma_\theta - \xi$. Модель 2.

Аналогично радиальным напряжениям распределение кольцевых напряжений по сечению муфты из СПФ на всех этапах фазового перехода является нелинейным и монотонным. На первом этапе процесса фазового перехода от его начала (кривая

1) и до выхода фронта фазового превращения на внешнюю границу муфты из СПФ (кривая 2) наблюдается увеличение σ_θ на внешнем радиусе и уменьшение на внутреннем, но при этом распределение σ_θ по сечению муфты остается достаточно равномерным (различие крайних значений не превосходит 50 МПа). На втором этапе фазового перехода происходит обратная тенденция, уменьшение σ_θ на внешнем радиусе, и резкое увеличение на внутреннем радиусе. Этот эффект можно квалифицировать, как перенапряжение, вызванное фазовым переходом. Не учет структурного перехода увеличивает наблюдаемую тенденцию на внутреннем радиусе муфты почти в 2 раза.

На рис.7 а, б приведены зависимости интенсивности напряжений от текущей температуры муфты из СПФ. Нумерация кривых соответствует нумерации представленной на рис.1.

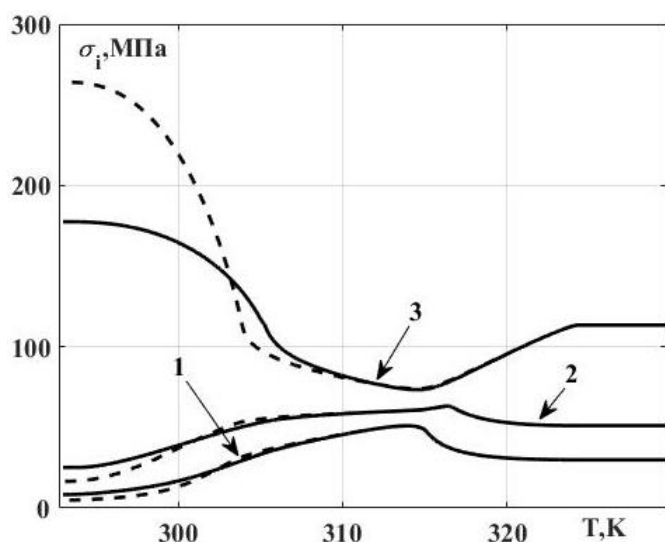


Рис.7а Зависимости $\sigma_i - T$.Модель 1.

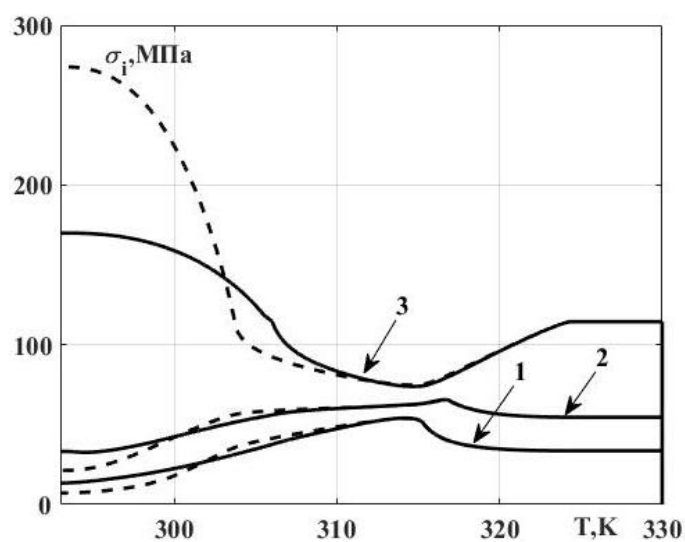


Рис.7б Зависимости $\sigma_i - T$.Модель 2.

Как видно из приведенных рисунков 7 а, б σ_i в реперных точках сечения толстостенной муфты из СПФ изменяется нелинейно и немонотонно на всех этапах фазового перехода. На первом этапе фазового перехода наблюдается уменьшение σ_i

на внутреннем радиусе и увеличение на внешнем радиусе оболочки. На втором этапе, в момент, когда фронт фазового перехода доходит до внешнего радиуса муфты наблюдается обратная тенденция. Учет структурного перехода приводит к уменьшению возникающих напряжений по всему сечению оболочки до 30% (кривые 3). Данная тенденция связана с тем, что процесс фазового перехода происходит неравномерно по сечению муфты, и когда на внутреннем радиусе параметр фазового состава достигает значения 1, что свидетельствует о окончании фазового перехода, в остальных точках сечения он еще продолжается. В следствии чего, при дальнейшем протекании процесса фазового перехода на внутреннем радиусе происходит накопление лишь структурных деформаций, а в остальных точках сечения накапливаются как структурные, так и фазовые деформации.

На рисунках 8 а,б представлены распределения параметра фазового состава по сечению оболочки для различных этапов процесса прямого термоупругого фазового превращения.

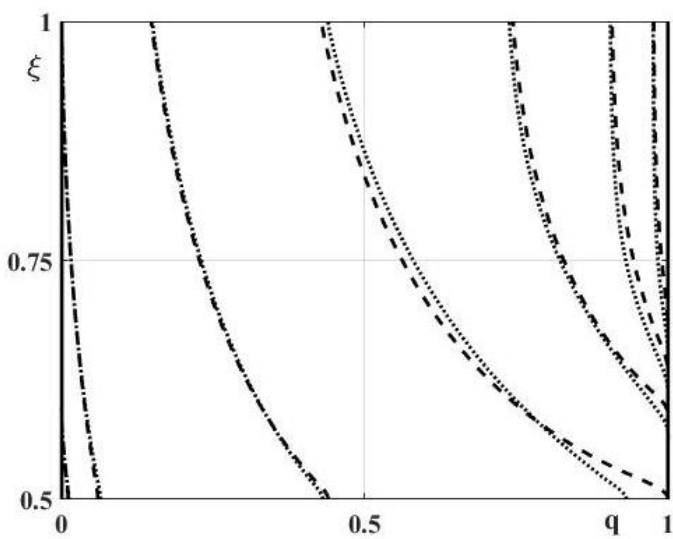


Рис.8а Зависимости $q - \xi$. Модель 1.

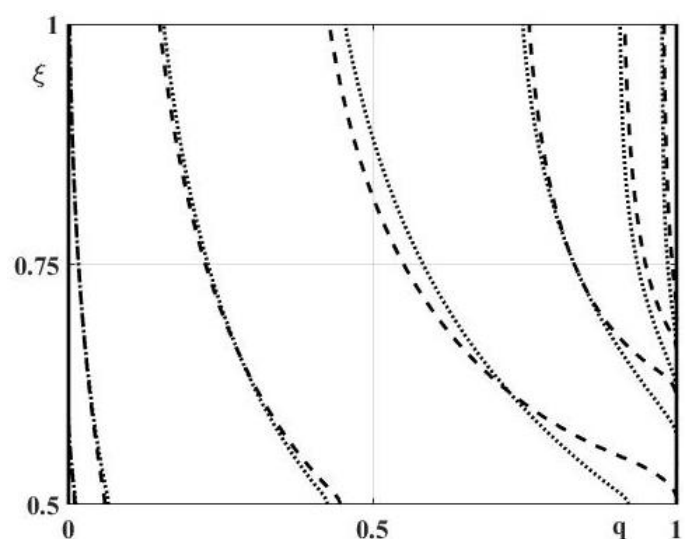


Рис.8б Зависимости $q - \xi$. Модель 2.

Кривая 1 – соответствует упругому решению задачи $T = 330$ К, 2 – этапу охлаждения $T = 324$ К, 3 – $T = 318$ К, 4 – $T = 312$ К, 5 – $T = 306$ К, 6 – $T = 300$ К, 7 – $T = 297$ К, 8 – $T = 295$ К, 9 – этапу завершения прямого превращения $T = 293$ К.

Из рис. 8 а, б наглядно видно, что влияние структурного перехода начинается только на втором этапе фазового перехода (с момента, когда фронт прямого превращения достигает внешнего радиуса муфты). Когда параметр фазового состава q на внутренней поверхности оболочки уже равен 1 и фазовый переход там завершен, в остальной части сечения рассматриваемый процесс продолжается. Это положение объясняет рост σ_i на внутреннем радиусе оболочки, наблюдаемый на рисунках 7 а, б.

На рис.9 а, б приведены зависимости параметра вида напряженного состояния μ_σ от текущей температуры муфты T . Кривая 1 – соответствует реперной точке на внешнем радиусе оболочки, кривая 3 – реперной точке на внутреннем радиусе.

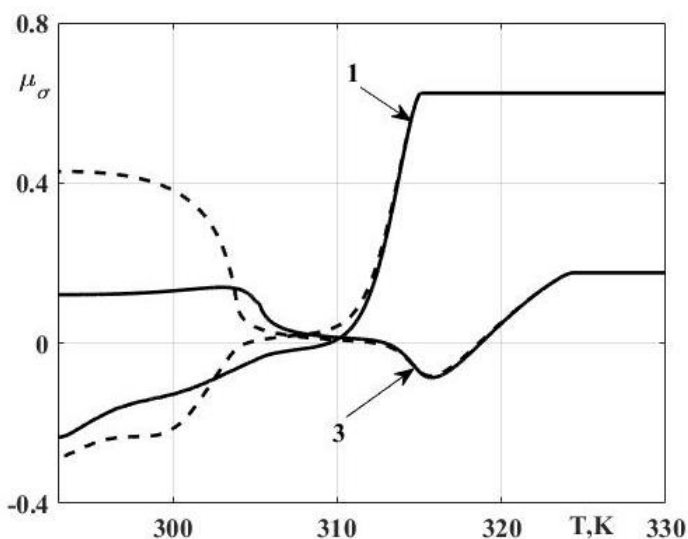


Рис. 9а Зависимость $\mu_\sigma - \xi$. Модель 1.

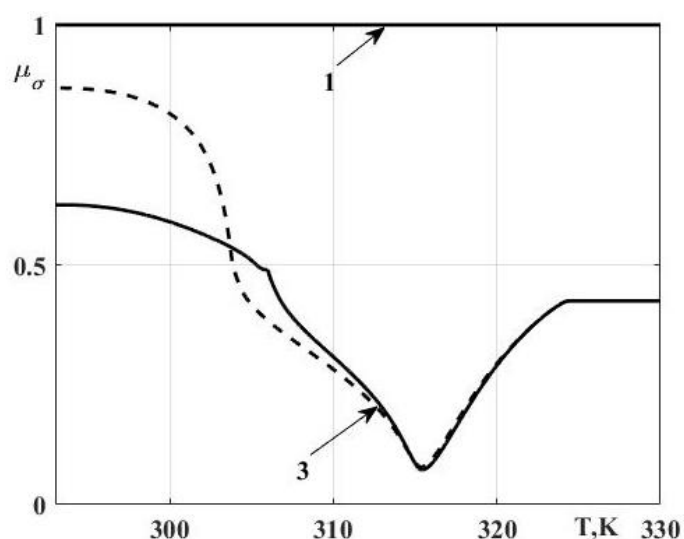


Рис. 9б Зависимость $\mu_\sigma - \xi$. Модель 2.

Распределение параметра вида напряженного состояния на всех этапах фазового перехода является немонотонным и нелинейным, кроме того, для модели 1

еще и знакопеременным. На первом этапе фазового перехода наблюдается уменьшение параметра μ_σ , как на внешнем, так и на внутреннем радиусе оболочки для модели 1 (рис.9 а), аналогичная тенденция наблюдается на внутреннем радиусе для модели 2, однако на внешнем радиусе параметр μ_σ на протяжении всего процесса соответствует состоянию одноосного растяжения. Данная тенденция объясняется выбором граничных условий при рассмотрении задач.

На втором этапе фазового перехода как для модели 1, так и для модели 2 на внутреннем радиусе наблюдается обратная тенденция, т.е. когда фронт фазового превращения доходит до внешнего радиуса наблюдается резкий рост параметра μ_σ . На внешнем радиусе для модели 2 тенденция сохраняется и параметр μ_σ соответствует состоянию одноосного растяжения (рис. 9б), а для модели два сохраняется тенденция к уменьшению параметра μ_σ вплоть до отрицательных значений.

В случае не учета структурного перехода наблюдаемые тенденции сохраняются, но не так ярко выражены. Кроме того, следует отметить, что в момент, когда фронт завершения фазового перехода достигает внешней границы тела, распределение параметра μ_σ во всем сечении стремится к однородному состоянию, соответствующему состоянию одноосного растяжения.

Выводы

В ходе работы разработана пользовательская модель материала в ПК Simulia Abaqus, позволяющая проводить численное моделирование явления прямого

мартенситного превращения в СПФ с учетом структурного перехода и свойства разносопротивляемости. В рамках работы решена краевая задача о предварительном деформировании (раздаче) толстостенной цилиндрической муфты из СПФ, находящейся под действием постоянного внутреннего давления и претерпевающей охлаждение через интервал температур прямого фазового превращения. Задача решена при двух типах граничных условий. Установлено, что учет структурного перехода уменьшает величину получаемых окружных напряжений и следовательно интенсивности напряжений на внутреннем радиусе. При этом наблюдается увеличение радиальных деформаций и смещений, отнесенных к радиальной координате соответствующих точек. Существенное изменение параметра вида напряженного состояния в процессе фазового перехода свидетельствует о необходимости использования модели, учитывающей зависимость параметра вида напряженного состояния от величины действующих напряжений для решения данного класса задач.

Список источников

1. Балуннов К.А., Соляев Ю.О., Голубкин К.С. Применение метода топологической оптимизации для синтеза конструктивно-силовой схемы в зоне излома крыла большого удлинения // Труды МАИ. 2023. № 129. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=173004>. DOI: [10.34759/trd-2023-129-04](https://doi.org/10.34759/trd-2023-129-04)

2. Шарунов А.В. Сравнение различных способов увеличения внутреннего радиуса толстостенной цилиндрической муфты из сплава с памятью форм // Труды МАИ. 2023. № 133. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=177659>
3. 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>
4. Климов А.К., Климов Д.А., Низовцев В.Е., Ухов П.А. Эффективность применения наноструктурных композиционных материалов и изделий из них в авиационной промышленности // Труды МАИ. 2013. № 67. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=41486>
5. Лихачев В.А., Кузьмин С.Л., Каменцева З.П. Эффект памяти формы. – Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1987. - 216 с.
6. Kargan M., Melton K. Shape memory alloy tube and pipe couplings // Proceedings of Engineering Aspects of Shape Memory Alloys, London, 1990, pp. 137-148.
7. 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)
8. Aerofit, Inc APT Laboratory, 1968-2004. URL: www.aerofit.com
9. Лихачев В.А., Шиманский С.Р. Влияние состава композиции TiNiNb на ее свойства и работоспособность. – Л., 1984. Деп. в ВИНТИ 10.12.84, № 7865-84.

10. Удовенко В.А., Потапов П.Л., Прокошкин С.Д. и др. Исследование функциональных свойств сплава Ti–45 % Ni–10 % Nb с широким гистерезисом мартенситного превращения // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2000. № 9. С. 19–22.
11. Абрамов В.Я., Александрова Н.М., Боровков Д.В. и др. Структура и функциональные свойства термически и термомеханически обработанных сплавов на основе Ti–Ni–Nb с широким мартенситным гистерезисом. I. Тройные сплавы Ti–Ni–Nb // *Физика металлов и металловедение*. 2006. № 4 (101). С. 436–446.
12. Попов Н.Н., Прокошкин С.Д., Сидоркин М.Ю. и др. Исследование влияния термомеханической обработки на структуру и функциональные свойства сплава 45Ti–45Ni–10Nb // *Металлы*. 2007. № 1. С. 71–77.
13. Попов Н.Н., Сысоева Т.И., Прокошкин С.Д. и др. Исследование механических свойств и реактивных напряжений сплавов с памятью формы системы Ti–Ni–Nb // *Металлы*. 2007. № 4. С. 62–70.
14. Попов Н.Н., Аушев А.А., Сысоева Т.И. и др. Исследования структуры, элементного, фазового составов и кинетики фазовых превращений в сплавах с памятью формы системы Ti–Ni–Nb // *Металлы*. 2012. № 4. С. 97–105.
15. Попов Н.Н., Ларькин В.Ф., Пресняков Д.В. и др. Исследование термомеханических характеристик сплавов системы Ti–Ni–Nb с памятью формы и влияния термической обработки на них // *Физика металлов и металловедение*. 2013. № 4 (114). С. 380–390.

16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. 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)
21. 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)

22. 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)
23. 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)
24. 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)
25. 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)
26. 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.
27. 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.

28. 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.
29. 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.
30. Золочевский А.А., Беккер А.А. Введение в ABAQUS. – Харьков: Гарант, 2011. – 49 с.
31. 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.

References

1. Balunov K.A., Solyaev Yu.O., Golubkin K.S. *Trudy MAI*, 2023, no. 129. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=173004>. DOI: [10.34759/trd-2023-129-04](https://doi.org/10.34759/trd-2023-129-04)
2. Sharunov A.V. *Trudy MAI*, 2023, no. 133. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=177659>
3. Khalov M.O. *Trudy MAI*, 2012, no. 55. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=30132>

4. Klimov A.K., Klimov D.A., Nizovtsev V.E., Ukhov P.A. *Trudy MAI*, 2013, no. 67.
URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=41486>
5. Likhachev V.A., Kuz'min S.L., Kamentseva Z.P. *Effekt pamyati formy* (Shape memory effect), Leningrad, Izd-vo Leningradskogo universiteta, 1987, 216 p.
6. Kapgan M., Melton K. Shape memory alloy tube and pipe couplings, *Proceedings of Engineering Aspects of Shape Memory Alloys*, London, 1990, pp. 137-148.
7. 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)
8. *Aerofit, Inc APT Laboratory*, 1968-2004. URL: www.aerofit.com
9. Likhachev V.A., Shimanskii S.R. *Vliyanie sostava kompozitsii TiNiNb na ee svoistva i rabotosposobnost'* (The influence of the composition of the Ti Ni Nb composition on its properties and performance), Leningrad, 1984. Dep. v VINITI 10.12.84, № 7865-84.
10. Udovenko V.A., Potapov P.L., Prokoshkin S.D. et al. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2000, no. 9, pp. 19–22.
11. Abramov V.Ya., Aleksandrova N.M., Borovkov D.V. et al. *Fizika metallov i metallovedenie*, 2006, no. 4 (101), pp. 436–446.
12. Popov N.N., Prokoshkin S.D., Sidorkin M.Yu. et al. *Metally*, 2007, no. 1, pp. 71–77.
13. Popov N.N., Sysoeva T.I., Prokoshkin S.D. et al. *Metally*, 2007, no. 4, pp. 62–70.
14. Popov N.N., Aushev A.A., Sysoeva T.I. et al. *Metally*, 2012, no. 4, pp. 97–105.

15. Popov N.N., Lar'kin V.F., Presnyakov D.V. et al. *Fizika metallov i metallovedenie*, 2013, no. 4 (114), pp. 380–390.
16. Sharunov A.V. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksii*, 2020, vol. 26, no. 2, pp. 174-189.
17. Mashikhin A.B., Movchan A.A. *Izvestiya RAN. Mekhanika tverdogo tela*, 2016, no. 3, pp. 100-114.
18. Mashikhin A.E., Movchan A.A. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika*, 2017, no. 3, pp. 113-128.
19. Movchan A.A., Kazarina S.A., Sil'chenko A.L. *Deformatsiya i razrushenie materialov*, 2018, no. 12, pp. 2-11.
20. 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)
21. 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)
22. 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)

23. 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)
24. 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)
25. 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)
26. Movchan A.A., Movchan I.A., Sil'chenko L.G. *Izvestiya RAN. Mekhanika tverdogo tela*, 2010, no. 3, pp. 118–130.
27. Movchan A.A., Sil'chenko L.G., Sil'chenko T.L. *Izvestiya RAN. Mekhanika tverdogo tela*, 2011, no. 2, pp. 44–56.
28. Mishustin I.V., Movchan A.A. *Izvestiya RAN. Mekhanika tverdogo tela*, 2014, no. 1, pp. 37–53.
29. Mishustin I.V., Movchan A.A. *Izvestiya RAN. Mekhanika tverdogo tela*, 2015, no. 2, pp. 78–95.
30. Zolocheskii A.A., Bekker A.A. *Vvedenie v ABAQUS* (Introduction to ABAQUS), Khar'kov, Garant, 2011, 49 p.

31. Movchan A.A. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksii*, 2021, vol. 27, no. 3, pp. 343-359.

Статья поступила в редакцию 27.12.2023

Одобрена после рецензирования 28.12.2023

Принята к публикации 27.02.2024

The article was submitted on 27.12.2023; approved after reviewing on 28.12.2023; accepted for publication on 27.02.2024