
НАДЕЖНОСТЬ, ПРОЧНОСТЬ, ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ

УДК 621.79.05

АНАЛИЗ КАЧЕСТВА СБОРКИ ТМС И КОНДИЦИОННОСТИ МЕТАЛЛА ПО ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ДИАГРАММЕ

© 2025 г. Д. У. Хасьянова

Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва, Россия

e-mail: dinara.khasyanova@mail.ru

Поступила в редакцию 14.07.2024 г.

После доработки 20.08.2024 г.

Принята к публикации 20.02.2025 г.

В статье представлены методики анализа качества сборки термомеханических соединений и оценки кондиционности металла по его термомеханической диаграмме.

Ключевые слова: эффект памяти формы, никелид титана, сверхупругость, термомеханическое соединение, фазовые превращения, термомеханические характеристики, муфта

DOI: 10.31857/S0235711925030066, **EDN:** GMNJEG

Трубопроводы в процессе эксплуатации подвергаются различным нагрузкам (статические, температурно-циклические, динамические, вибрационные и т. д.). Кроме того, они должны быть герметичны. Наиболее нагруженными являются трубопроводы в летальных аппаратах, на которые эти нагрузки действуют в комплексе [1, 2].

Давление рабочей жидкости современных гидросистем [3] постоянно возрастает. Увеличение давления в гидросистемах вызвано стремлением уменьшить массу трубопроводов и исполнительных механизмов, т. к. с увеличением давления уменьшаются размеры силового привода, потребные расходы рабочей жидкости.

Термомеханические соединения (ТМС), выполненные муфтами, образуются за счет значительного изменения размеров соединительного элемента при фазовых превращениях в материале муфты.

Степень надежности соединений ТМС, при прочих равных условиях, определяется качеством и совершенством технологии изготовления, формоизменения и монтажа муфт, что в свою очередь требует стабильности термомеханических характеристик материалов с ЭПФ во всем интервале условий эксплуатации [4].

Сплавы на основе никеля и титана наряду с пластичностью, псевдоупругостью, ферроупругостью обладает рядом уникальных свойств, таких как проявление эффекта памяти формы, сверхупругости, изменение модуля упругости, предела текучести в процессе мартенситного превращения, сопровождающегося изменением кристаллической решетки [5].

Сохранение исходной формы, находясь под напряжением, не превышающим предела упругости, и возврат к первоначальным размерам при снятии этих напряжений являются “памятью” материала. Это свойство присуще для всех конструкционных материалов. Однако такая память имеет существенные недостатки: ее объем составляет доли процента (~ до 0.5%); невозможность сохранения промежуточно-деформированного состояния материала при снятии внешних напряжений [6].

В настоящее время известны сотни сплавов, проявляющих термоупругие мартенситные превращения (МП). Наиболее технологичными, обладающими высокими физико-механическими характеристиками являются сплавы на основе Ti и Ni [7].

Основной деформационно-силовой характеристикой сплавов с эффектом памяти формы (ЭПФ) в интервале мартенситной неупругости является термомеханическая диаграмма. Она представляет собой зависимость $\sigma_R(\varepsilon_S)$ реактивных напряжений от величины деформации недовосстановления, причем ее однозначность подтверждена экспериментально в ряде работ [8].

При паспортизации специальных свойств материала термомеханическую диаграмму обычно определяют при заданной деформации растяжением μ_p^+ . Для построения этой зависимости берется партия образцов одной плавки, одинакового химического состава и термообработки, при изготовлении полуфабрикатов из исследуемого материала по единому технологическому процессу. Графическая иллюстрация методики ее экспериментального определения показаны в работе [9].

Для термомеханических соединений трубопроводов (ТМС) муфты изготавливают из сплава ТН1К с интервалом фазовых переходов в области криогенных температур. Поэтому при исследовании данного материала предварительная деформация образцов в мартенсите осуществляется в жидком азоте при температуре ниже точки M_K – конца прямого мартенситного превращения (МП).

Максимальная величина напряжений возврата соответствует деформации недовосстановления, равной объему памяти формы $\varepsilon_p = \varepsilon_V$. Под объемом памяти понимают критическое значение заданной деформации, которая восстанавливается полностью при нагреве в свободном состоянии.

Экспериментальные исследования показывают, что при нагреве выше точки A_K^Φ реактивные напряжения мало меняются вплоть до температуры развития активных процессов релаксации и ползучести, связанных с увеличением диффузионной подвижности атомов $T_{\text{раб}}$. Для сплавов типа ТН1К и ТН1 она составляет $T_{\text{раб}} \sim +280$ град [10]. В интервале температур $A_K^\Phi - T_{\text{раб}}$ имеет место и обычная релаксация, однако она практически не влияет на величину напряжений возврата.

Нижняя граница термостабильности σ_R определяется температурой начала прямого МП M_H , т. е. интервал работоспособности ТМС составляет $M_H - T_{\text{раб}}$.

Величины напряжений возврата для различных партий сплавов ТН1К и ТН1 имеют относительно большой разброс, поскольку они существенно зависят от содержания примесей внедрения, наличия неметаллических дисперсионных выделений, текстуры и других факторов, определяющих уровень механических свойств аустенита, а также термообработки и скорости нагрева в интервале обратного МП. Отметим, что скорость нагрева связана с историей термического нагружения материала.

В инженерной практике термомеханическую диаграмму можно задать в нелинейной форме

$$\sigma_R = A\varepsilon_S^m, \quad (1)$$

где A, m – экспериментальные коэффициенты, учитывающие особенности структуры, химического состава сплава, термообработки и вид заданной деформации.

Характер термомеханической кривой и величина реактивных напряжений возврата существенно зависят от вида заданной деформации (табл. 1) [9].

Кинематическая схема сборки и формирования ТМС с обозначением основных размеров и окружающих деформаций деталей представлена на рис. 1.

В позиции 1 тщательно измеряют геометрические размеры колец $(b, R)_{i=1}$ и $(r, a)_{i=2}$ [11]. Относительные размеры деталей в ТМС $K_1 = b/R$ и $K_2 = r/a$. После охлаждения в жидком азоте до температуры ниже интервала прямого МП осуществляется

Таблица 1. Примерные значения термомеханических характеристик сплава ТН1К в зависимости от вида заданной деформации

Вид заданной деформации	Растяжение	Сжатие	Изгиб*	Кручение*
ε_V	0.08–0.09	0.038–0.043	0.08–0.10	0.12–0.13
$\sigma_{R, \max}$, МПа	320–400	550–700	450–550	240–280

* – для изгиба и кручения значения наибольших реактивных напряжений и объема памяти формы даны для внешней поверхности образцов.

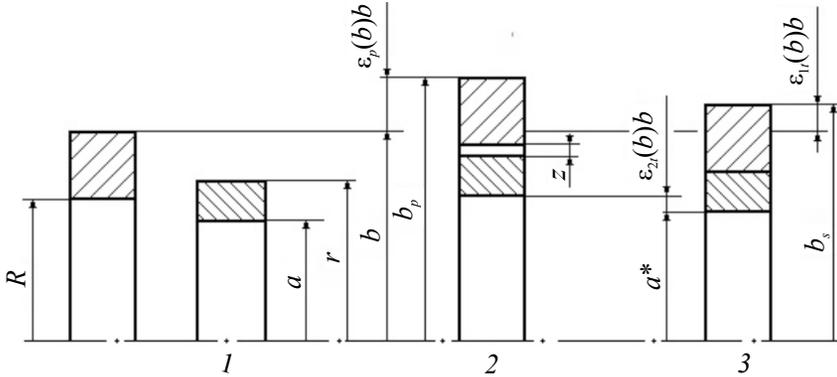


Рис. 1. Кинематическая схема сборки и образования имитатора ТМС:

1 – исходные размеры деталей при изготовлении; 2 – радиальная раздача наружного кольца и сборка соединения; 3 – получение напряженной посадки в результате термического формовосстановления наружной втулки и обжатия трубы.

радиальная раздача наружного кольца или втулки конической прошивкой. Затем в позиции 2 охватывающая деталь свободно надевается на внутреннюю втулку и собирается имитатор соединения. Базирование узла осуществляется на сборочной плите по плоскости колец.

В процессе естественного нагрева в интервале температур обратного фазового перехода имитатор муфты стремится восстановить свою исходную до деформации форму и плотно обжимает внутреннее тело. В результате термомеханического возврата с противодействием в охватывающей детали возникают реактивные напряжения, что приводит к образованию контактной нагрузки в стыке ТМС. После формирования напряженной посадки в позиции 3 измеряется наружный радиус b_s силового элемента и радиус отверстия a^* внутреннего тела.

Анализ качества сборки ТМС и кондиционности металла по термомеханической диаграмме. Для обеспечения наибольшей вибропрочности ТМС трубопроводов муфта с ЭПФ должна иметь минимальную массу. Потому ее заданная деформация осуществляется на величину, равную объему памяти формы $\varepsilon_p = \varepsilon_V^+$. Практический опыт эксплуатации этих соединений показывает, что они обладают высокой работоспособностью и надежностью только в том случае, когда по всей толщине стенки трубы отмечается сквозное течение металла. Таким образом, при наименьшем диаметре трубы с учетом величины сборочного зазора z (рис. 1), т. е. при максимальной деформации свободного формовосстановления на ее внешней поверхности достигается предел текучести σ_{2T} . Дальнейшее увеличение контактной нагрузки влечет за собой нерациональное утяжеление муфты. В то же время величина зазора z должна быть недостаточной для проведения комфортной сборки и компенсации уменьшения посадочного диаметра муфты в результате ее упругого восстановления после предварительной деформации.

Вычислим величину контактной нагрузки q_S , при которой начинается сквозное течение внутреннего цилиндра. В условиях плоской деформации из соотношения

$$\varepsilon_{2i} = \varepsilon_{2i} / \sigma_{2i} q \left(\sqrt{3 + K_2^4} / K_2^2 - 1 \right) \text{ находим}$$

$$q_S = \sigma_{2T} \left(K_2^2 - 1 / \sqrt{K_2^4 + 3} \right). \quad (2)$$

Из анализа этого соотношения следует, что для данной расчетной модели найденное значение контактной нагрузки не зависит от характера деформационной кривой, а только от предела текучести материала трубы.

Для сравнения вычислим величину q_S для диска при его плоском напряженно-деформированном состоянии. Компоненты деформации на его посадочной поверхности при $\rho = r$ находим как

$$W_2(\rho) = - \left(\frac{q\Psi_2}{A_2} \right)^{1/m_2} \left(\rho + \frac{3a^2}{\rho} \right), \quad (3)$$

определяются следующими соотношениями:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_{2r}(\rho) = \frac{1}{\rho} W_2(\rho) = -\chi \left(1 + 3/K_2^2 \right) \\ \varepsilon_{2r}(\rho) = \frac{dW_2(\rho)}{d\rho} = \chi \left(3/K_2^2 - 1 \right) \end{array} \right\}, \quad (4)$$

при обозначении

$$\chi = \left(q_S \Psi_2 / A_2 \right)^{1/m_2}. \quad (5)$$

Подставим равенства (4) в выражение для интенсивности деформации при $\rho = r$

$$\varepsilon_{2i}(r) = \varepsilon_{2T} = \left(\sigma_{2T} / A_2 \right)^{1/m_2}.$$

Отсюда получаем

$$\left(\sigma_{2T} / A_2 \right)^{1/m_2} = \frac{2}{3} \left(q_S \Psi_2 / A_2 \right)^{1/m_2} \sqrt{1 + 27/K_2^4}. \quad (6)$$

Следовательно,

$$q_S = \frac{\sigma_{2T}}{\Psi_2} \left(3/2 \sqrt{1 + 27/K_2^4} \right)^{m_2}. \quad (7)$$

Результаты расчета минимальной контактной загрузки q_S начала сквозной пластической деформации цилиндров и колец из стали 12X18M10T в зависимости от параметра K_2 приведены в табл. 2 и на рис. 2 для следующих характеристик кривой растяжения: $A_2 = 1100$ МПа, $m_2 = 0.19$, $\sigma_{2T} = 380$ МПа.

Определим теперь наименьшее значение контактного давления q_S для ТМС цилиндров с внутренним силовым элементом из сплава с памятью формы. При сквозном течении наружной втулки на всю толщину стенки:

$$q_S = \sigma_{2T} \left(K_1^2 - 1 \right) / \sqrt{3K_1^4 + 1}. \quad (8)$$

Таблица 2. Величина наружного давления на цилиндр из стали 12Х18Н10Т при начале распространения пластической деформации на всю толщину его стенки в зависимости от параметра K_2

Параметр	Значение					
	1.05	1.10	1.20	1.30	1.40	1.50
K_2	1.05	1.10	1.20	1.30	1.40	1.50
K_2^2	1.1025	1.210	1.440	1.690	1.960	2.250
Ψ_2	16.720	8.390	4.540	3.262	2.623	2.246
$q_{S(k)}$, МПа	18.2	36.9	70.3	100.6	128.4	153.8
$q_{S(u)}$, МПа	18.97	37.8	74.2	108.3	139.5	167.3
$q^*_{S(u)}$, МПа	18.07	34.4	62.2	84.8	103.1	118.1

* – для ТМС с внутренним силовым элементом с ЭПФ при нагружении наружного цилиндра по поверхности отверстия.

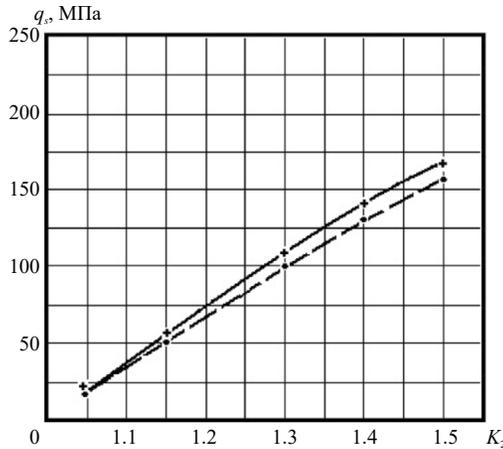


Рис. 2. Влияние параметра K_2 при нагружении цилиндра из стали 12Х18Н10Т наружным давлением на его величину при распространении пластической деформации на всю толщину стенки: 1 – +, цилиндр; 2 – •, кольцо.

Для сравнения результаты расчета зависимости $q_S(K_1)$ при $\sigma_{2T} = 380$ МПа приведены в последней строке табл. 2.

Из анализа полученных данных следует, что для расчетной модели напряженно-го соединения цилиндров для обеспечения сквозного течения внутренней втулки по сравнению с имитатором ТМС колец требуется более высокая контактная нагрузка q_S , причем расхождение кривых $q_S(K_2)$ растет при увеличении значения K_2 . Однако для реальных размеров труб эта разница невелика.

В основе оценки качества сборки ТМС трубопроводов наружной муфтой типа “Крайофит” [12] лежит сравнение измеренной и расчетной величины окружной деформации невосстановления. Считается, что соединение обладает необходимыми эксплуатационными характеристиками, если

$$\varepsilon_{1r}(b) > \varepsilon_{1r(\text{рас})}(b), \text{ где } \varepsilon_{1r}(b) = b_S/b - 1. \quad (9)$$

Расчетная норма на внешней поверхности муфты при условии $q = q_S$ определяется из равенства

$$\varepsilon_{1r(\text{рас})}(b) = \frac{\sqrt{3}}{2K_1^2} \left[\frac{\sqrt{3}qK_1^2}{A_1^+(K_1^2 - 1)} \right]^{\frac{1}{m_1^+}}. \quad (10)$$

Это выражение позволяет найти и фактическую величину контактной нагрузки в напряженном соединении цилиндров по измеренному значению деформации недвосстановления:

$$q = \frac{A_1^+ (K_1^2 - 1)}{\sqrt{3} K_1^2} \left[\frac{2 K_1^2}{\sqrt{3}} \varepsilon_{1r}(b) \right]^{m_1^+}. \tag{11}$$

В качестве практического примера определим минимальное значение окружной деформации недвосстановления муфты из сплава ТН1К с установленными параметрами термомеханической диаграммы $A_1^+ = 1840$ МПа и $m_1^+ = 0.667$.

При $K_2 = 1.20$ трубы из стали 12Х18Н10Т $q_S = 74.2$ МПа. Из расчета по формуле (10) получаем: $\varepsilon_{1r}(b) > 0.02893$ при $K_1 = 1.35$ и $\varepsilon_{1r}(b) > 0.01716$ при $K_1 = 1.50$.

Для соединения трубопроводов с внутренней муфтой при заданной деформации сжатием должно удовлетворяться следующее условие для наружной поверхности трубы:

$$\varepsilon_{1r}(b) > \varepsilon_{1r(\text{рас})}(b), \text{ где } \varepsilon_{1r}(b) = b^*/b - 1. \tag{12}$$

В этом случае $\varepsilon_{1r(\text{рас})}(b)$ определяется из следующего соотношения

$$\varepsilon_{1r(\text{рас})}(b) = \frac{K_1^2 + 1}{K_1^2} \left[\frac{q_S (\sqrt{3} K_1^4 + 1)^{1-m_1}}{A_1 (K_1^2 - 1)} \right]^{\frac{1}{m_1}}, \tag{13}$$

где вместо параметров термомеханической диаграммы A_1^+ и m_1^+ берутся значения коэффициентов деформационной кривой материала трубы A_1 и m_1 .

Деформация недвосстановления в поперечном сечении наружного силового цилиндра из никелида титана распределена неравномерно и падает по мере приближения к его внешней поверхности. Поэтому с ростом толщины стенки цилиндра несколько снижается его силоотдача, отнесенная к единице объема. Эффективность увеличения параметра K_1 характеризуется градиентом увеличения контактной нагрузки или отношением $q/\sigma_R(\varepsilon_S)$.

Из равенства $\varepsilon_{1r}(R) = \frac{\sqrt{3}}{2} \left[\frac{\sqrt{3} q K_1^2}{A_1^+ (K_1^2 - 1)} \right]^{m_1^+}$ при $\rho = r$ имеем

$$q = A_1^+ \frac{K_1^2 - 1}{\sqrt{3} K_1^2} \left(\frac{2 \varepsilon_{1r}}{\sqrt{3}} \right)^{\frac{1}{m_1^+}}.$$

Учитывая, что

$$\frac{2}{\sqrt{3}} \varepsilon_{1r} = \varepsilon_{1i} = \varepsilon_S, \sigma_R = A_1^+ \varepsilon_S^{m_1^+},$$

можем записать:

$$q/\sigma_R(\mu_S) = \frac{K_1^2 - 1}{\sqrt{3} K_1^2}. \tag{14}$$

Зависимость (14) приведена на рис. 3, из анализа которой следует, что утяжелять муфту более чем на $K_1 > 2$ нецелесообразно. Полученные данные полностью согласуются с результатами работы [13].

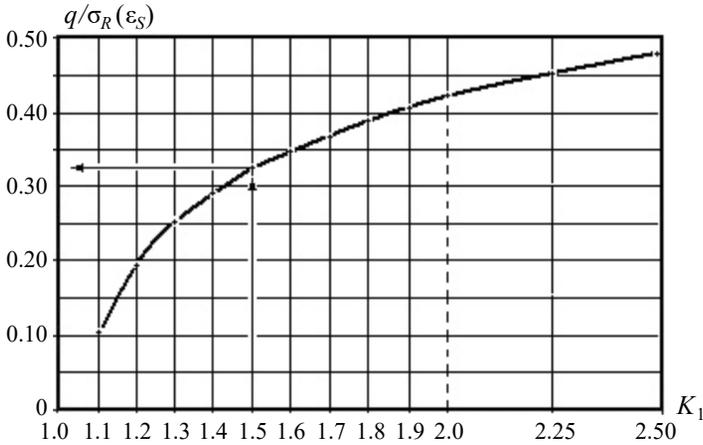


Рис. 3. Номограмма для приближенного определения контактной нагрузки в термомеханическом соединении цилиндров.

Номограмму (14) можно использовать и для приближенного расчета минимального уровня контактной нагрузки в ТМС цилиндров, что показано стрелками на рис. 3 обычно наружный силовой элемент с ЭПФ имеет толщину стенки не более

$$H < 2.5h, \quad (15)$$

где h – толщина стенки охватываемой детали (трубы).

Отсюда, при

$$K_2 = r/(r - h), \quad K_1 = 1 + 2.5h/r. \quad (16)$$

В реальных соединениях трубопроводов окружная деформация $\varepsilon_{2r}(r)$ наружной поверхности трубы, как правило, составляет ~ 0.005 .

Величина деформации свободного формовосстановления муфты, определяемая технологический зазором z и наименьшим диаметром трубы, в пределах минусового поля допуска d_{-Dd} допускается не более $\varepsilon_{1r}(r) \sim 0.020$. В противном случае рекомендуются селективная сборка или изготовление двух типоразмеров муфт для одного диаметра трубы.

Таким образом,

$$\varepsilon_{1r}(r) = \varepsilon_V^+ - \varepsilon_{1r}(r) - \varepsilon_{2r}(r) \geq 0.055. \quad (17)$$

Отсюда для предельных значений K_1 (16) и $\varepsilon_{1r}(r)$ (17) по формуле (14) нетрудно вычислить величину q . Может быть решена и обратная задача определения параметра K_1 по $\varepsilon_{1r}(r) = 0.055$ при $q = q_S(K_2)$.

Важнейшим моментом является оценка качества полуфабрикатов сплава ТН1К, который идет на изготовление муфт ТМС. Заключение о кондиционности материала делается на основании неравенства

$$q > q_S(K_2) \quad (18)$$

Величина $q_S(K_2)$ вычисляется по заданным размерам трубы (r, h) из равенства (3) по параметру K_2 . Затем находят значение K_1 из соотношения (16) и определяют

контактное давление $q(K_1)$ из выражения (14) по экспериментальным коэффициентам термомеханической диаграммы A_1^+ и m_1^+ для $\epsilon_{1r}(r) = 0.055$. При выполнении неравенства (18) металл считается годным.

Вычислительная схема анализа кондиционности сплава приведена для наглядности на рис. 4. В качестве практического примера оценим качество сплава ТН1К для получения муфт ТМС трубопроводов из стали 12Х18Н10Т диаметром $d = 14.0$ мм с толщиной стенки $h = 1.5$ мм при $\sigma_{2T} = 380$ МПа.

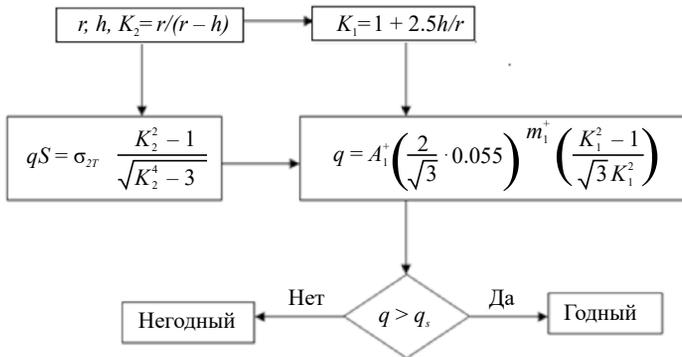


Рис. 4. Вычислительная схема анализа кондиционности сплава ТН1К по его термомеханической диаграмме.

Параметры термомеханической диаграммы сплава ТН1К: $A_1^+ = 1840$ МПа, $m_1^+ = 0.667$.

Из соотношения (3) находим минимальное значение контактной нагрузки, необходимое для сквозного течения трубы при $K_2 = 1.273$, $q_S = 99.4$ МПа. Затем из выражения (14) при $K_1 = 1.536$ и $\epsilon_{1r}(r) = 0.055$ определяем давление $q = 97.4$ МПа.

Неравенство (18) свидетельствует о том, что исследуемый материал не соответствует необходимым характеристикам в полной мере. Поэтому для столь жесткой трубы необходим сплав с более высокой потенциальной энергией возврата, либо увеличение значения $\epsilon_{1r}(r)$ за счет групповой сборки ТМС.

Выводы. В статье были предложены эффективные методики анализа качества сборки ТМС и оценки кондиционности металла по его термомеханической диаграмме. Для расчетной модели напряженного соединения цилиндров для обеспечения сквозного течения внутренней втулки по сравнению с имитатором ТМС колец требуется более высокая контактная нагрузка, причем расхождение кривых растет при увеличении значения. Однако для реальных размеров труб эта разница невелика.

Финансирование. Работа финансировалась за счет средств бюджета Института машиноведения им. А. А. Благонравова. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марченко Е. С., Байгонова Г. А., Клопов А. А., Дубовиков К. М., Шишелова А. А. Микроструктура, мартенситные превращения и эффект памяти формы биосовместимых сплавов на основе TiNi // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2020. Т. 17. № 4. С. 466–472.
2. Сапожников В. М., Комаров А. Н. Трубопроводы и соединения для гидросистем. М.: Машиностроение, 1967. 232 с.

3. *Omori T., Ando K., Okano M., Kainuma R., Ishida K.* Superelastic effect in polycrystalline ferrous alloys // *Science*. 2011. V. 333 (6038). P. 68–71.
<https://doi.org/10.1126/science.1202232>
4. *Глазунов С. Т. и др.* Нитинол – сплав с памятью // *Авиационная промышленность*. 1975. № 9. С. 95–97.
5. Эффект памяти формы в сплавах / Пер. с англ. под ред. В. А. Займовского. М.: Металлургия, 1979. 472 с.
6. *Чернов Д. Б., Паскаль Ю. И., Гюнтер В. Э. и др.* Диаграммы структурных превращений сплавов на основе никелида титана и эффекты памяти формы // *Изв. вузов. Физика*. 1981. № 3. С. 93–95.
7. *Hust J. G., Weitzel D. H., Rowell R. L.* Thermal conductivity, electrical resistivity and Thermopower of aerospace alloys from 4 to 300°K // *J. Nat. Bur. Standards* 75 A. 1971. № 4. P. 269.
8. *Cooper J. E., Weitzel D. H., Rowell R. L., Cross W. B.* Capacity of 55-Nitinol Allow // *J. Nat. Bur. Standards* 1969. V. 65A. P. 265.
9. *Шишкин С. В., Махутов Н. А.* Расчёт и проектирование силовых конструкций на сплавах с эффектом памяти формы. М.: НИЦ “Регулярная и хаотическая динамика”, 2007. 412 с.
10. *Шишкин С. В.* К расчету концентрации контактной нагрузки в соединениях с натягом тонкостенных деталей // *Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации*. 2019. Т. 22. № 3. С. 79–91.
11. *Khasyanova D. U.* Analyzing the Dimension of Thermo-Mechanical Coupling. *J. Mach. Manuf. Reliab.* 2022. V. 51. P. 650–658.
<https://doi.org/10.3103/S105261882207007X>
12. *Шишкин С. В.* Обеспечение качества соединений трубопроводов муфтами с эффектом памяти формы // *Авиационная промышленность*. 2018. № 3–4. С. 82–87.
13. *Khasyanova D. U.* Testing Technology and Basic Requirements for Cryogenic Thermomechanical Joint Samples of Rings and Cylinders // *J. Mach. Manuf. Reliab.* 2022. V. 51. P. 858–863.
<https://doi.org/10.3103/S1052618822080118>