

УДК 621.791.763

## ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ТОНКОСТЕННЫХ СОСУДОВ ДАВЛЕНИЯ

© 2010 Ж.М. Бледнова, И.С. Мышевский

Кубанский государственный технологический университет, Краснодар

Поступила в редакцию 06.04.2010

Предложен способ упрочнения тонкостенных сосудов давления с использованием упрочняющих кольцевых элементов из материалов с эффектом памяти формы (ЭПФ). Выполнен аналитический расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) для бесконечной открытой оболочки с одним кольцевым элементом из сплава с ЭПФ. С помощью метода конечных элементов (МКЭ) произведен расчет НДС для замкнутой оболочки средней длины на примере корпуса никель-водородного аккумулятора, усиленного кольцевыми элементами из сплава NiTi. С помощью методов планирования эксперимента определен оптимальный шаг установки кольцевых элементов, позволивший увеличить удельную энергоемкость никель-водородных аккумуляторов (НВА) в 1,55 раз.

Ключевые слова: *тонкостенный сосуд, память формы, долговечность*

В настоящее время сплавы с эффектом памяти формы (ЭПФ) в области машиностроения используются для обеспечения надежных разъемных соединений, в качестве ответственных деталей самоустанавливающихся и самонастраивающихся конструкций, исполнительных элементов и др. Распространение получили гладкие цилиндрические соединения (в основном труб газо- и нефтепроводов), в которых муфты из сплавов с ЭПФ обеспечивают гарантированный натяг между соединяемыми деталями. Такой способ позволяет избегать сложных и дорогостоящих работ, связанных с монтажом, и практически полностью исключает дефекты соединений. Материал муфты выбирается с низким интервалом мартенситных превращений (МП) и высокими прочностными характеристиками для предотвращения разгерметизации и обеспечения надежности соединения [1].

Одним из перспективных направлений является использование конструктивных элементов из сплавов с ЭПФ в качестве упрочняющих. Так, для повышения прочности и надежности сварных тонкостенных оболочек, в том числе и трубопроводов, можно устанавливать упрочняющие кольцевые элементы (УКЭ) на внешней стороне. В качестве УКЭ

для создания предварительного напряжения сжатия может использоваться продеформированная в интервалах характеристических температур высокопрочная проволока из материала с ЭПФ.

**Целью настоящей работы** является оценка целесообразности использования УКЭ из материалов с ЭПФ для обеспечения надежности тонкостенных сосудов давления (ТСД) потенциально опасных объектов.

Известно, что использованием сварки для изготовления ТСД, как и для соединения трубопроводов, на сегодняшний день является распространенным техническим приемом, считающимся самым надежным, особенно на потенциально опасных объектах. При этом следует учитывать, что сварные швы «плохо» работают на растяжение и имеют склонность к образованию мелких трещин. Эффективным приемом повышения уровня безопасности и поддержания высокой надежности систем нормальной эксплуатации, может оказаться укрепление сварных швов ТСД и трубопроводов (патрубков, оборудования и т.п.). Основные особенности этого метода заключаются в следующем [2]: значительное снижение растягивающих напряжений в зонах соединения; защита от межкристаллитной коррозии (скорость роста трещин уменьшается); разгрузка при работе, сжатие при остановке; независимость от размеров – проволока одного и того же размера используется для различных диаметров трубопроводов и сосудов.

*Бледнова Жесфина Михайловна, доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой динамики и прочности машин. E-mail: blednova@mail.ru*  
*Мышевский Игорь Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры динамики и прочности машин. E-mail: myshevsky@mail.ru*

Термомеханический цикл получения УКЭ состоит из нескольких этапов: изготовления, дорнования и установки. УКЭ из сплава NiTi изготавливаются с внутренним диаметром меньше номинального наружного диаметра цилиндрической части оболочки и находятся в аустенитном состоянии. Внутренний диаметр УКЭ зависит от многих факторов: возвращаемой в процессе восстановления деформации, величины реактивных напряжений, механических свойств и др. Обычно внутренний диаметр УКЭ отличается от внешнего диаметра оболочки не более чем на 4 %. При температурах, значительно ниже температуры конца МП  $M_f$ , производится дорнование колец до посадочных размеров. Температура дорнования определяется из уравнения (1) [3]

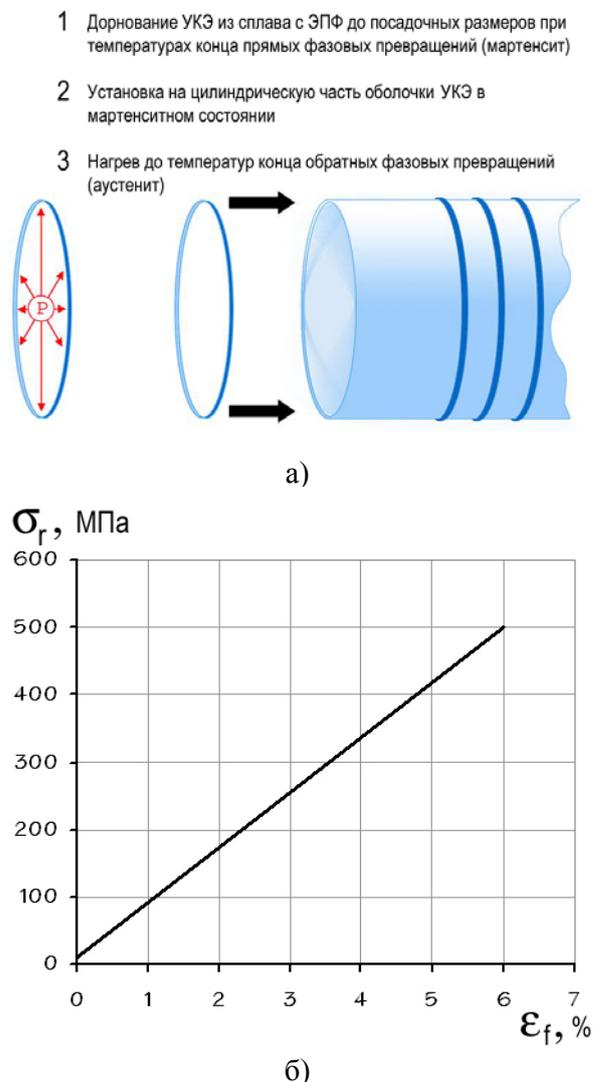
$$T^* = T - \frac{T_0}{q_0} D_{ij} \tau_{ij} \quad (1)$$

где  $T^*$  – эффективная температура превращения;  $T_0$  – температура термодинамического равновесия;  $q_0$  – тепловой эффект реакции;  $D_{ij}$  – дисторсия превращения;  $\tau_{ij}$  – компонента тензора напряжений.

В процессе дорнования под действием растягивающих напряжений температура образования первых порций мартенсита в процессе охлаждения возрастает. Рост кристаллов мартенсита при прямом превращении происходит до тех пор, пока есть аустенит в любом месте кристалла. Образовавшийся кристалл мартенсита полностью ограничивает его обратную реакцию. В большинстве случаев реальные свойства кристаллов определяются не столько среднестатистическими свойствами кинетики локального превращения, сколько самим распределением этих свойств по локальным объемам. Это объясняется неодинаковыми условиями роста кристаллов мартенсита в каждом конкретном месте и влияет на ширину петли гистерезиса. Ввиду этого даже сплавы одинакового состава и обработки могут иметь различия в ширине петли гистерезиса. Этот факт необходимо учитывать при использовании материалов с ЭПФ, сделав предварительный эксперимент.

Следующим этапом является установка УКЭ в мартенситном состоянии на цилиндрическую часть, перпендикулярно оси оболочки, и последующий нагрев до температур выше температуры конца обратного МП  $A_f$ , переводящий УКЭ в аустенитное состояние. В результате фазовых превращений кольца из материала с ЭПФ «вспоминают» свою первоначальную

форму и сжимаются, создавая тем самым дополнительные сжимающие напряжения в стенках оболочки. Практически установка УКЭ выполняется при помощи специальных инструментов с низкой теплопроводностью, для предотвращения значительного нагрева. Монтажное оборудование для установки компактно, что позволяет осуществлять сборку в ограниченном пространстве. Для монтажа конструкции не нужна специальная подготовка персонала, занимающегося установкой, и не требуется никакого специального мастерства. Важным является и то обстоятельство, что свойства материала вблизи установленных УКЭ не ухудшаются. Кроме того, при необходимости легко осуществляется разборка соединения при низкой температуре (рис. 1).



**Рис. 1:** а) технологическая схема монтажа оболочки, б) зависимость реактивных напряжений от невосстановленной деформации сплава Ni55,5Ti44,5

Для этой технологической схемы упрочнения оболочки необходимо знать характеристику материала с ЭПФ, с помощью которой можно было бы осуществлять расчеты элементов конструкции на прочность. Можно сформулировать наиболее общие требования к ней [4]: универсальность отражения силовых и энергетических возможностей материала; простота экспериментального выявления и аналитического описания; возможность использования характеристики для прочностного расчета элементов конструкций из сплавов типа NiTi, работающих по различным схемам противодействия при восстановлении материала. Применительно к исследуемому сплаву Ni55,5Ti44,5 и сплавам типа ТН1 и ТН1К, в пределах зоны их термоупругой пластичности, наиболее полно этим требованиям отвечает закономерность, которая отражает зависимость напряжений, генерируемых материалом, от деформации недовосстановления, снятую для предварительно деформированных растяжением образцов в условиях восстановления с постоянным противодействием.

Методика определения этой характеристики материала состоит в следующем [4]: из партии полученных полуфабрикатов изготавливают стандартный образец; осуществляют типовую термообработку образца и уточняют его геометрические параметры; переводят материал образца в мартенситное состояние и осуществляют его одноосное растяжение в пределах зоны генерируемой пластичности материала, фиксируя при этом значения приложенных напряжений и размер наведенной деформации; не разгружая образец, приступают к его восстановлению, нагревая выше точки  $A_f$ ; определяют размер деформации недовосстановления ( $\varepsilon_f$ ); на координатной плоскости « $\varepsilon_f - \sigma_r$ » определяют положение точки, координаты которой получены в результате испытания; соединив эту точку с началом координат, выявляют искомую силовую характеристику сплава. Для исследуемого сплава на основе TiNi зависимость «реактивные напряжения – невосстановленная деформация» представлена на рис. 1,б. Зная невосстановленную УКЭ деформацию, можно по зависимости « $\varepsilon_f - \sigma_r$ » определять напряжения в кольцах, контролируя тем самым напряженное состояние в стенках оболочки.

**Оценка НДС оболочек, усиленных материалами с ЭПФ.** Рассматривается краевая задача для открытой бесконечной цилиндрической оболочки радиуса  $R$ , толщиной стенки  $h$ , нагруженной внутренним давлением  $P$ , с установленным на внешнюю поверхность цилиндрической части одним УКЭ из материала с ЭПФ, создающим в стенках оболочки

сжимающие напряжения, не превышающие предела текучести материала оболочки при  $P=0$ . В основе расчета принимается гипотеза Кирхгофа-Лява. Введем оси координат  $\omega$  и  $x$ : ось  $\omega$  направим от оси оболочки по радиусу, ось  $x$  – по образующей. Известно, что такую оболочку можно рассчитывать как балку на упругом основании. Соответствующее дифференциальное уравнение имеет вид:

$$\frac{d^4 \omega(x)}{dx^4} + 4a^4 \omega(x) = \frac{P}{D} \quad (2)$$

где  $a = \sqrt[4]{\frac{3(1-\mu^2)}{R^2 h^2}}$ ;  $D$  – цилиндрическая жесткость.

Решая его, находим радиальное перемещение  $\omega$  оболочки для текущей координаты  $x$ . Постоянные интегрирования определяются из условий

$$M(x) = D \frac{d^2 \omega(x)}{dx^2}, \quad Q(x) = D \frac{d^3 \omega(x)}{dx^3},$$

$$\frac{q}{4a} = M|_{x=0}, \quad -\frac{q}{2} = Q|_{x=0}, \quad (3)$$

где  $M$  – изгибающий момент;  $Q$  – поперечная сила;  $q$  – интенсивность распределенной нагрузки, создаваемой УКЭ. Меридиональные и окружные напряжения вычисляются по формулам:

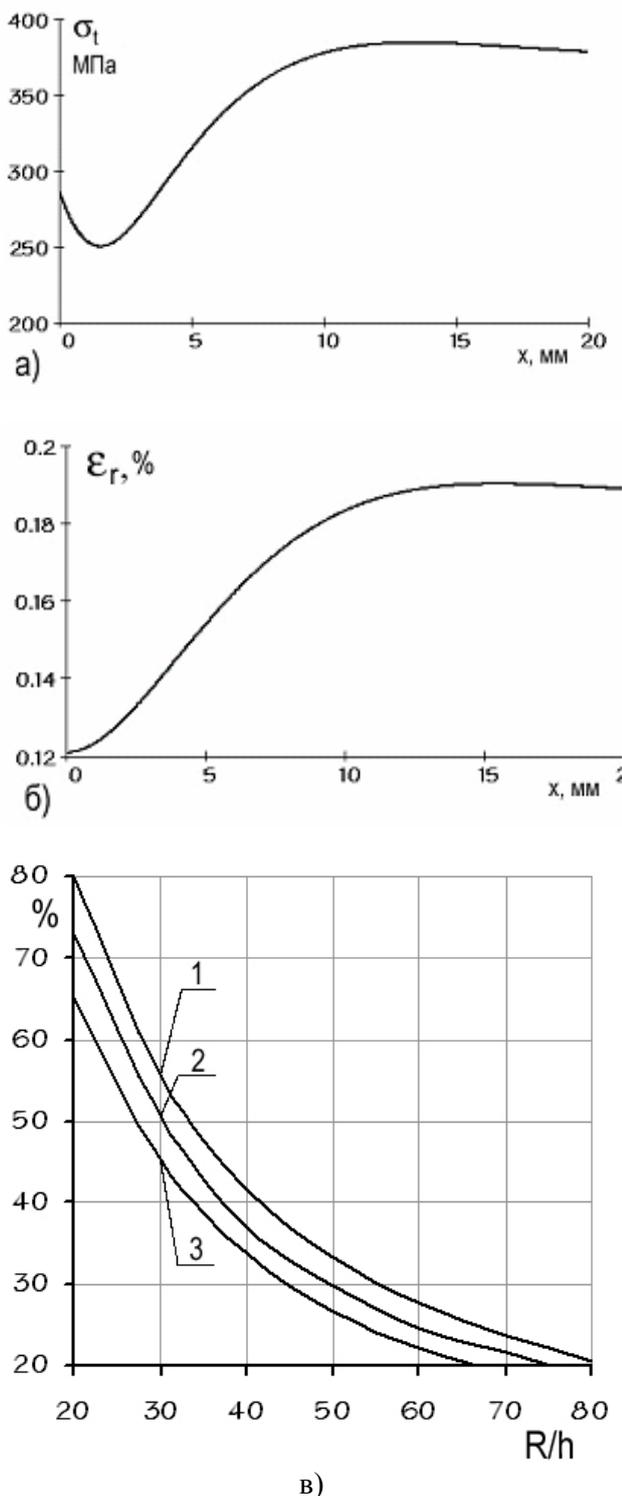
$$\sigma_m(x) = \frac{6M(x)}{h^2}, \quad \sigma_t(x) = \frac{6\mu M(x)}{h^2} + \frac{E\omega(x)}{R} \quad (4)$$

Для определения оптимального значения параметра  $q$  необходимо минимизировать напряжения в стенках оболочки вблизи установки УКЭ:

$$\sigma_{\text{экв}}(x, q) \rightarrow \min, \quad x \rightarrow 0 \quad (5)$$

Найденное значение  $q$  из условия (5) подставляем в уравнения (3,4) и находим напряжения  $\sigma_m$  и  $\sigma_t$ . Далее определяем  $\omega(x)$  [5].

Определение режимов термомеханического цикла получения УКЭ для конкретной задачи сводится к нахождению радиальных перемещений оболочки  $\omega$ . Для этого достаточно, чтобы возвращаемая сплавом с ЭПФ деформация была гарантированно больше требуемой величины  $\omega$ , при этом величина реактивных напряжений может быть определена по зависимости «реактивные напряжения – невосстановленная деформация».



**Рис. 2.** Распределение окружных напряжений (а) и радиальной деформации (б) оболочки вблизи установки УКЭ; линии относительного уменьшения эквивалентных напряжений вблизи установки УКЭ в зависимости от отношения  $R/h$  (1 –  $P=6$  МПа; 2 –  $P=7$  МПа; 3 –  $P=8$  МПа) – (в)

Окружные напряжения достигают минимального значения не в месте контакта УКЭ с оболочкой, а на некотором расстоянии от него (рис. 2,а). Расчет произведен для УКЭ,

выполненного из сплава Ni55,5Ti44,5 при  $R=50$  мм;  $h=0,8$  мм;  $P=6$  МПа,  $E=2 \cdot 10^5$  МПа,  $\mu=0,3$  (положение УКЭ соответствует координате  $x=0$ ). На достаточном расстоянии от кольца напряжения совпадают с теми, которые получаются в результате расчета оболочки по безмоментной теории. Произведен расчет относительного уменьшения напряжений вблизи установки УКЭ в зависимости от давления и отношения  $R/h$  (рис. 2,в).

**Конечно-элементный расчет сосуда давления.** Полученное выше решение определяет НДС оболочки, усиленной одним УКЭ и являющейся открытой и бесконечной. На практике чаще приходится сталкиваться с замкнутыми оболочками конечной длины. В таких оболочках НДС зависит от соотношений между диаметром и продольным размером оболочки. Длинной будем называть такую цилиндрическую оболочку, у которой отношение длины к диаметру больше 4. В роли замкнутой цилиндрической оболочки конечной длины рассматривается корпус никель-водородного аккумулятора (НВА) космического назначения. В качестве УКЭ – кольца из проволоки Ni55,5Ti44,5 диаметром 1 мм. Корпус НВА представляет собой сварной тонкостенный сосуд давления, состоящий из цилиндрической части и двух сферических или торосферических днищ. Процесс эксплуатации НВА сопровождается циклическим изменением давления водорода, коррозионным износом внутренней поверхности корпуса аккумулятора, что приводит к накоплению повреждений в стенках корпуса, и, в особенности, вблизи сварных швов. Одним из путей повышения ресурса корпуса НВА является легирование сварных швов материалами на основе NiTi. Проведенные исследования [6] показали, что в режиме малоциклового нагружения, при малых амплитудах деформации, число циклов до разрушения для сварных образцов, легированных Ni55,5Ti44,5, увеличивается почти в 2 раза. Кроме того, сплавы на основе NiTi обладают сбалансированными механическими свойствами.

Согласно безмоментной теории оболочек, работающих под давлением, максимальным главным напряжением является окружное напряжение в цилиндрической части. Поэтому наиболее слабым местом корпуса НВА является цилиндрическая часть, содержащая продольный сварной шов. В процессе заряд-разряда аккумулятора, в зависимости от его типа, изменение давления водорода происходит в пределах 2,0-8,0 МПа, при рабочих температурах от  $-10$  до  $40^{\circ}\text{C}$ , при этом удельная

энергия аккумулятора зависит от этих параметров. Для поддержания оптимальной температуры ( $\approx 15^{\circ}\text{C}$ ) используются различные типы тепловых интерфейсов (по периметру, к боковым поверхностям или к днищу корпуса). В качестве хладагентов используются теплообменные контуры или газ. Процесс заряда-разряда происходит по следующей схеме. В результате электрохимических реакций, протекающих в процессе заряда аккумулятора, внутреннее давление и температура повышаются, при этом давление для отдельных типов аккумуляторов поднимается до 8,0 МПа, а температура до  $30\text{--}35^{\circ}\text{C}$ . За время разряда, в условиях эксплуатации, температура падает до  $0\text{--}10^{\circ}\text{C}$ , а давление до 2,0-3,0 МПа.

Одним из путей повышения удельных характеристик НВА является эффективное использование массы металлоемких частей при условии обеспечения прочности. Основная задача состоит в увеличении удельной энергоемкости НВА за счет оптимального выбора режимов упрочнения, включающих: установку колец из сплава NiTi на цилиндрическую часть сосуда с определенным шагом и оптимизацию массовых характеристик корпуса НВА. Краевые эффекты от каждого кольца в отдельности оказывают влияние на соседние. Для расчета НДС НВА, усиленного УКЭ, целесообразно использовать численные методы. Нами выполнено конечно-элементное моделирование корпуса в программе MSC/Nastran for Windows V4.0 на ЭВМ AMD Athlon(tm)XP 1,46 ГГц. Для уменьшения времени и сложности расчет, ввиду геометрической симметрии оценка НДС корпуса НВА производилась для его половины. Аппроксимация корпуса НВА производилась плоскими элементами типа Plate, наиболее подходящими и рекомендуемыми при моделировании оболочек. Элемент Plate способен учитывать все внутренние силовые факторы: мембранные, сдвиговые, поперечные и изгибные. Разбивка на плоские конечные элементы происходила при помощи вращения линейных элементов на части контура оболочки на  $180^{\circ}$  вокруг оси цилиндрической части. Штуцер, служащий для нагнетания масла в процессе механических испытаний корпуса НВА, с подкладным кольцом в днище оболочки аппроксимировался объемными элементами типа Solid (рис. 3,а). Вблизи концентраторов напряжений и места установки УКЭ производилось уменьшение размеров конечно-элементной сетки.

Основными факторами, влияющими на характеристики прочности и массу корпуса

НВА, являются: внутреннее давление и шаг установки колец. В качестве исходного прототипа был выбран корпус аккумулятора НВ-40 из сплава ХН78Т со сферическими днищами, рассчитанный на внутреннее давление не более 5,5 МПа, и размерами: толщина стенки 0,8 мм, продольная длина цилиндрической части 200 мм, радиус 50 мм. В качестве упрочняющих элементов устанавливаются на внешнюю цилиндрическую поверхность корпуса сосуда под прямым углом к оси цилиндрической части неразъемные УКЭ, выполненные из проволоки Ni55,5Ti44,5 диаметром 1 мм. Установка УКЭ происходит в мартенситном состоянии со свободной посадкой, а возвращаемая в аустенитном состоянии деформация создает сжимающие напряжения в стенках сосуда, не превышающие предела текучести материала сосуда.

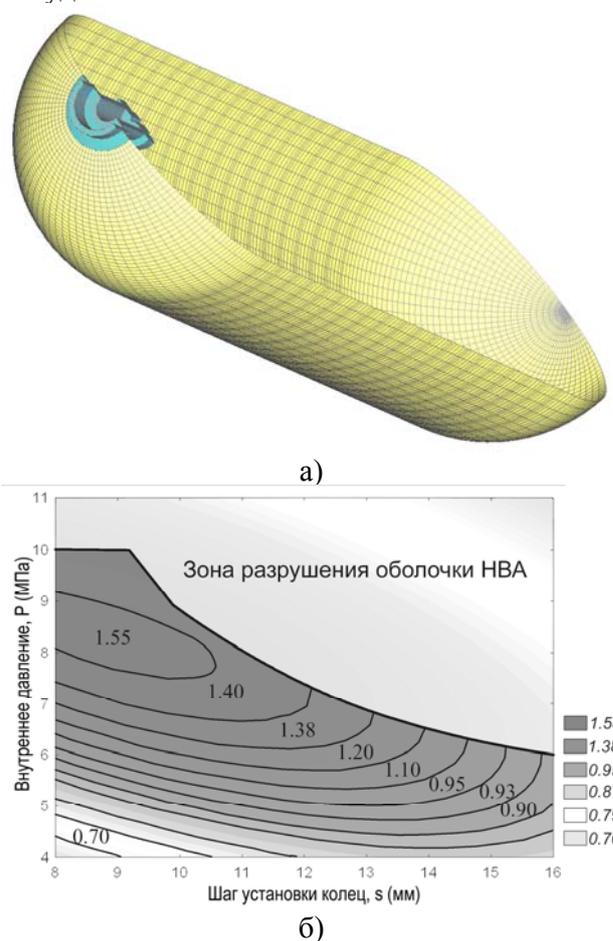
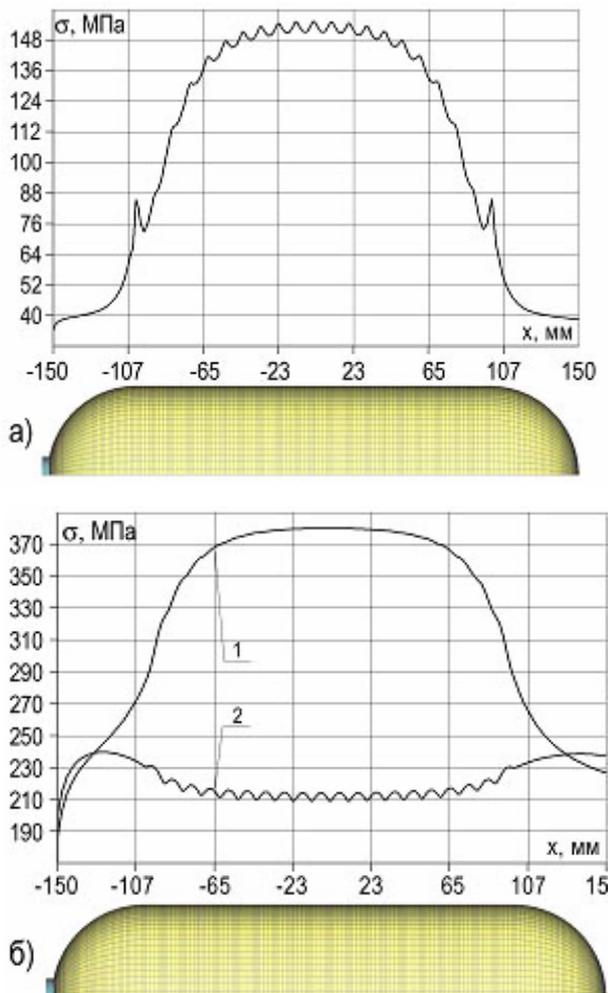


Рис. 3: а) конечно-элементная модель корпуса НВА; б) изолинии относительного изменения энергоемкости НВА

Сжимающие усилия, создаваемые УКЭ на цилиндрической поверхности оболочки, моделировались равномерно распределенной нагрузкой, задаваемой по узлам конечно-элементной сетки, перпендикулярно поверхности оболочки. Интенсивность распределенной

нагрузки определялась согласно зависимости «реактивные напряжения – невосстановленная деформация» для сплава Ni55,5Ti44,5 (рис. 1, б) и величине прогиба оболочки, не превышающей 0,2%. Граничные условия для цилиндрической части и сферических днищ запрещали повороты осевых сечений. Проведенный расчет показал снижение напряжений в цилиндрической части оболочки на 75%, при условии сохранения упругих деформаций материала оболочки в разгруженном состоянии (рис. 4).



**Рис. 4.** Распределение эквивалентных напряжений в оболочке (а – с установленными с шагом  $s=10$  мм УКЭ; б – (1) под действием внутреннего давления  $P=7$  МПа, (2) - под действием внутреннего давления  $P=7$  МПа с установленными с шагом  $s=10$  мм УКЭ)

Для поиска оптимальных режимов упрочнения корпуса НВА с учетом его весовых характеристик использовался двухфакторный ротatable план численного эксперимента. В качестве факторов эксперимента выступали:  $s$  – шаг установки УКЭ, определяющий увеличение веса оболочки, и  $P$  – максимально допустимое внутреннее давление. Целевой

функцией являлись максимальные значения эквивалентных напряжений в оболочке. Согласно плану эксперимента было проведено 10 расчетов оболочки, из которых 3 не удовлетворяли условиям прочности. В результате получены графики распределения напряжений и деформаций оболочки при разных внешних нагрузках. Все графики распределения напряжений и деформаций имели характерный вид, представленный на рис. 4. В итоге построена номограмма, позволяющая оценивать энергоёмкость НВА в зависимости внутреннего давления и шага установки УКЭ (рис. 3,б).

Расчет показал, что установка УКЭ с шагом более 15 мм не дает положительного результата, а приводит лишь к увеличению массы корпуса НВА. Объясняется это затуханием краевого эффекта, приводящего к резкому увеличению напряжений между кольцами. Шаг менее 9 мм приводит к увеличению веса, однако не позволяет увеличивать внутреннее давление из-за нарушения условия прочности в днищах. Оптимальным шагом установки УКЭ является  $s=9-10$  мм, при котором давление может составлять  $P=8-9$  МПа без снижения ресурса и надежности корпуса НВА.

#### Выводы:

1. На основе известного дифференциального уравнения, описывающего изгиб балки на упругом основании, произведен аналитический расчет НДС для бесконечной открытой оболочки с одним УКЭ из сплава с ЭПФ; определены величины относительного уменьшения напряжений вблизи установки УКЭ.

2. С помощью МКЭ произведен расчет НДС для замкнутой оболочки средней длины на примере корпуса НВА, усиленного кольцевыми элементами из сплава NiTi (патент РФ № 2286507); определен оптимальный шаг установки кольцевых элементов, позволивший увеличить удельную энергоёмкость НВА в 1,55 раз.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. *Otsuka, K.* Mechanism of shape memory effect and superelasticity / K. Otsuka, C.M. Wayman // Shape memory materials, eds. *Otsuka K. and Wayman C.M.* – Cambridge University Press, Cambridge, 1998. – P. 27-48.
2. *Ионайтис, Р.Р.* Кольцевые разъемные укрепители с памятью формы для сварных швов трубопроводов АЭС / *Р.Р. Ионайтис, Б.А. Поляков, В.П. Смирнов, М.А. Туктаров* // Сб. тр. XXVIII сем. Актуальные проблемы прочности, СПб, 2001. – С. 421-426.
3. *Лихачев, В.А.* Структурно-аналитическая теория прочности / *В.А. Лихачев, В.Г. Малинин.* – СПб.: Наука, 1993. – 471 с.

4. *Лямин, В.А.* О силовой паспортной характеристике сплавов на основе никелида титана / *В.А. Лямин, А.Е. Лямин* // Сб. тр. XXVIII семинара Актуальные проблемы прочности, СПб, 2001. – С. 491-493.
5. Пат. 2286507 Российская Федерация, МПК F17C 1/00 (2006.01). Способ упрочнения тонкостенных сосудов давления / *Бледнова Ж.М., Мышевский И.С.*; заяв. и патентообл. КубГТУ – № 2004138342/06; заявл. 27.12.04; опубл. 27.10.06, Бюл. №30. – 7 с.
6. *Бледнова, Ж.М.* Структура и свойства сварных соединений с использованием присадочного материала с памятью формы / *Ж.М. Бледнова, И.С. Мышевский* // Сварочное производство. – 2009. - № 10. – С. 5-8.

## **APPLICATION OF MATERIALS WITH SHAPE MEMORY EFFECT FOR INCREASING DURABILITY OF THIN-WALLED PRESSURE VESSELS**

© 2010 Z.M. Blednova, I.S. Myshevsky

Kuban State Technological University, Krasnodar

The way of strengthening the thin-walled pressure vessels with use of strengthening ring elements from materials with shape memory effect (SME) is offered. Analytical calculation of tension-deformed state (TDS) for the infinite open shell with one ring element from alloy with SME is executed. By means of finite element method (FEM) calculation of SME is made for the closed shell of average length on an example of the case nickel-hydrogen accumulator strengthened by ring elements from alloy NiTi. By means of planning experiment methods the optimum step of installation the ring elements, allowed to augment specific power consumption of nickel-hydrogen accumulators (NHA) in 1,55 times is certain.

Key words: *thin-walled vessel, shape memory, durability*

---

*Zhesfina Blednova, Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Head of the Department of Dynamics and Durability of  
Machines. E-mail: blednova@mail.ru*  
*Igor Myshevsky, Candidate of Technical Sciences, Associate  
Professor at the Department of Dynamics and Durability of  
Machines. E-mail: myshevsky@mail.ru*