

УДК 669.05.12

РАБОТОСПОСОБНОСТЬ СФЕРИЧЕСКИХ СЕГМЕНТОВ ПОСЛЕ ВЫЛЕЖИВАНИЯ В РАЗЛИЧНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

М.А.Хусаннов, А.Б.Бондарев, О.А.Малухина, Н.В.Маркина

THE WORKING ABILITY OF SPHERICAL SEGMENTS AFTER HOLDING IN DIFFERENT CLIMATE CONDITIONS

M.A.Khusainov, A.B.Bondarev, O.A.Malukhina, N.V.Markina

Политехнический институт НовГУ, Mikhail.Khusainov@novsu.ru

Исследовано влияние вылеживания на взрывной характер памяти формы сферических сегментов из сплавов никелида титана с реализацией эффекта скачка с ударом о препятствующее тело. Показано, что силовые характеристики сегмента, генерируемые в материале сегмента, зависят от их формоизменения при вылеживании. Проведен анализ работоспособности сферических сегментов на различных этапах вылеживания. Предложены оптимальные размеры сегментов, обеспечивающие их стабильную работоспособность после вылеживания в различных климатических условиях.

Ключевые слова: сферические сегменты, вылеживание, работоспособность, высота отскока, генерация, сила удара

The influence of holding on the explosive behavior of titanium nickelide shape memory spherical segments at which there is a jump with an impact on the obstacle is investigated. It is shown that the segment force parameters generating in the segment material depend on their form change at holding. The analysis of the spherical segments' working ability at several stages of holding is carried out. The segment optimal sizes providing their stable working ability after holding in different climate conditions are proposed.

Keywords: spherical segments, holding, working ability, jump height, generation, impact force

Обнаруженный нами взрывной характер термоупругой деформации памяти формы сферических сегментов из сплавов никелида титана [1,2] стал предметом активного изучения. Экспериментально установлено, что данное явление обусловлено потерей устойчивости сегмента в фазовом переходе мартенсит →

аустенит. Температура, при которой сегмент теряет устойчивость (T_{ny}) и прощелкивает к исходной форме, находится вблизи температуры A_f — окончания обратного мартенситного превращения [3,4]. Показано, что если сферический сегмент (с заданной памятью) деформировать (прогнуть) в мартенсите зеркально ис-

ходной форме, то при нагреве до аустенитного состояния произойдет восстановление формы сегмента скачком (с хлопком). А при наличии препятствия на пути возврата формы — с ударом о препятствие. Описанное явление использовалось при создании запорных клапанов-отсекателей [5-7], в которых сферический сегмент при заданной температуре срабатывает скачком, закрывая проходное отверстие в клапане. Сферический сегмент в этом случае будет находиться в напряженном состоянии вследствие изменения температуры и давления рабочей среды. Все это может оказывать существенное влияние на структурное состояние сплава, уровень реактивных напряжений, генерируемых в материале сегмента, и температуру срабатывания.

В этой связи возрастает необходимость исследования стабильности функционально-механических свойств сферических сегментов в условиях длительной эксплуатации как в свободном состоянии (до срабатывания), так и в заневоленном (после срабатывания). Эти вопросы пока не изучены. Известные нам работы, посвященные термомеханическим соединениям из никелида титана [8] и термоэлементом, используемым в термореле [9], не дают определенного представления о механическом поведении сферических сегментов из сплавов с памятью формы. В данной работе проведены систематические исследования стабильности функциональных свойств сферических сегментов в зависимости от длительности выдержки (вылеживания) в трех термостатирующих камерах с температурами $(20 \pm 2^\circ\text{C})$, $(4 \pm 1^\circ\text{C})$, $(-15 \pm 2^\circ\text{C})$ в свободном состоянии (незащемленном) по типу хранения и стесненном (защемленном) после срабатывания. Исследования выполнялись на сферических сегментах $D = 16,6 \pm 2$ мм, (рис.1), изготовленных из сплава Ti-50,35at%Ni и эквиатомного состава с температурами мартенситных превращений $M_f = 8^\circ\text{C}$, $M_s = 19^\circ\text{C}$, $A_s = 32^\circ\text{C}$, $A_f = 44^\circ\text{C}$ сплава Ti-50,35at%Ni и $M_f = 20^\circ\text{C}$, $M_s = 42^\circ\text{C}$, $A_s = 56^\circ\text{C}$, $A_f = 78^\circ\text{C}$ сплава Ti-50,0at%Ni.

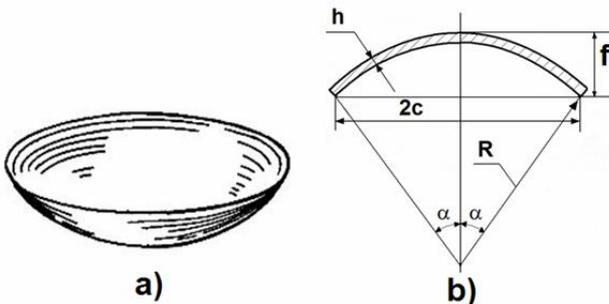


Рис.1. Общий вид сферического сегмента и его геометрические параметры: h — толщина пластинки; R — радиус кривизны; c — радиус в плане; f — стрела подъема; 2α — центральный угол

Оценка стабильности функциональных свойств сферических сегментов осуществлялась после вылеживания с некоторой периодичностью путем измерения высоты отскока сегмента ($H_{отс}$) с хлопком от поверхности, нагретой до температуры потери устойчивости, и по силе удара ($P_{уд}$) о силоизмеритель. На рис.2,3 приведены устройства для определения эффекта скачка сегмента и силы удара о силоизмеритель разрывной машины FPZ-1.

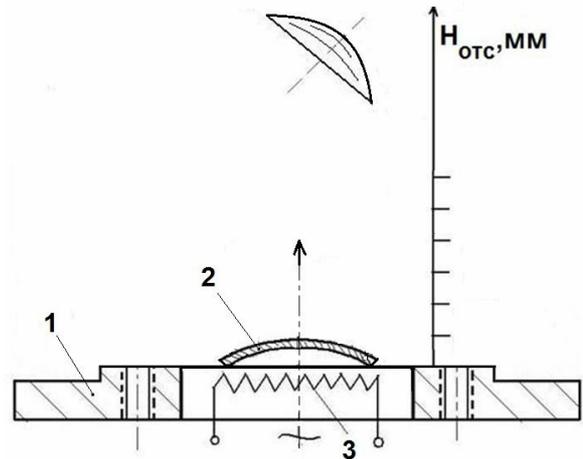


Рис.2. Устройство для измерения высоты отскока сферического сегмента от нагретой поверхности: 1 — корпус; 2 — сферический сегмент; 3 — нагревательный элемент

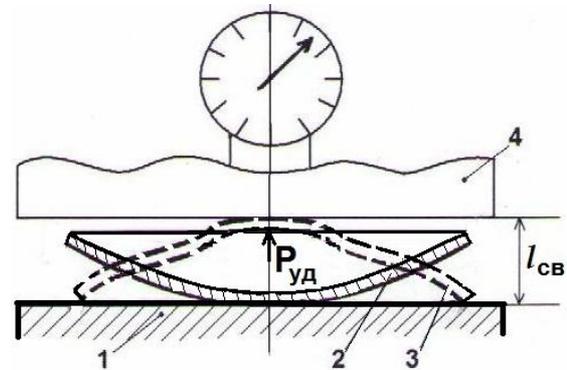


Рис.3. Схема положения сферического сегмента после прогиба в мартенсите и последующего отогрева с ударом о силоизмеритель: 1 — поверхность нагревателя; 2 — сферический сегмент после прогиба в мартенсите; 3 — сферический сегмент после отогрева; 4 — силоизмеритель

Параллельно выполненные испытания сегментов по определению высоты отскока и силы удара позволили получить аппроксимирующую функцию типа $P_{уд} = 0,0028H_{отс} + 3,005$, демонстрирующую закономерную взаимосвязь силовых параметров $H_{отс}$ и $P_{уд}$ (рис.4). Такой подход не требует трудоемкой работы по определению силы удара с помощью разрывной машины.

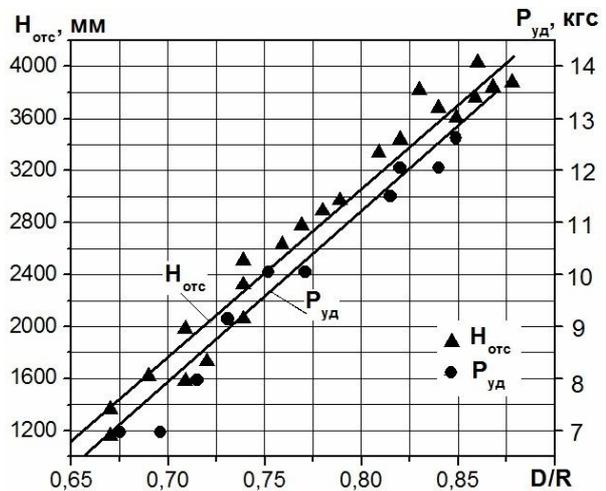


Рис.4. Зависимость высоты отскока ($H_{отс}$) и силы удара ($P_{уд}$) сферических сегментов от соотношения D/R

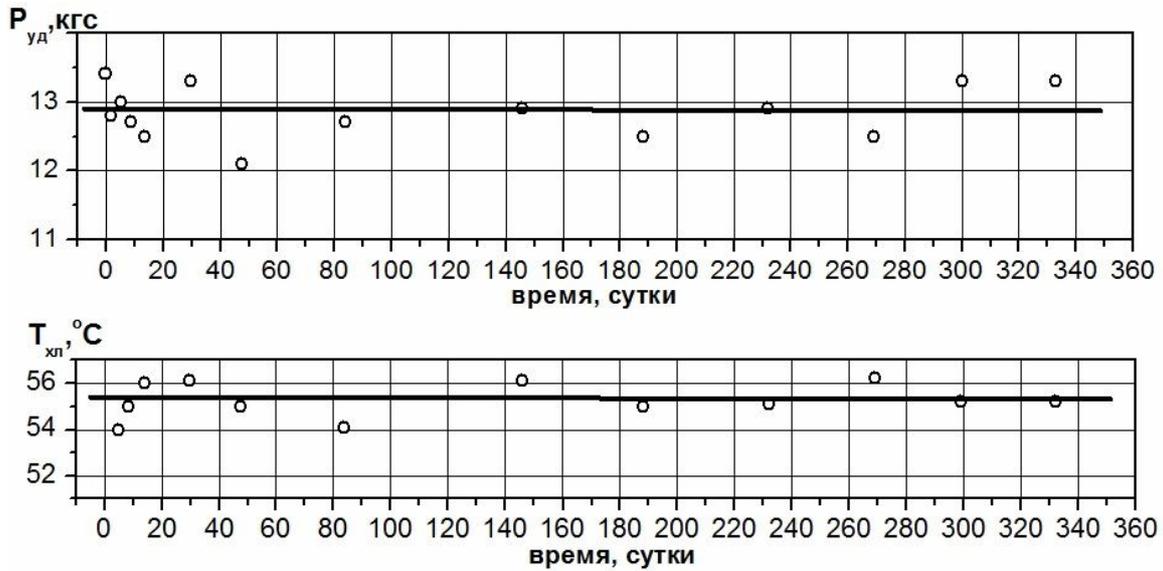


Рис.5. Зависимость $P_{уд}$ и $T_{хл}$ от длительности вылеживания при температуре $20\pm 2^\circ\text{C}$. Сплав Ti-50,35at%Ni

На рис.5 представлены результаты влияния вылеживания сферических сегментов из сплава Ti-50,35at%Ni при $20\pm 2^\circ\text{C}$ на силу удара ($P_{уд}$) о силоизмеритель (динамометр) и температуру скачка сегмента с хлопком ($T_{хл}$).

Видно, что $P_{уд}$ и $T_{хл}$ сферических сегментов практически не меняются в течение 350 суток. Разброс значений силы удара и температуры хлопка на первых десяти сутках связывается с неравновесной структурой, сформированной на этапе многократной перекрестной прокатки с промежуточными отжигами, от начальной толщины пластинки (~1 мм) до конечной (0,45-0,48). Значения силы удара и $T_{хл}$ сферических сегментов из сплава эквиатомного состава несколько выше, чем обогащённых никелем, при меньшем рассеянии измеряемых параметров во всем интервале вылеживания (рис.6). Из рисунка следует, что структура данного сплава достаточно стабильная, поскольку оба параметра ($P_{уд}$ и $T_{хл}$) не изменяются в течение продолжительного времени вылеживания

(300 суток). Разброс значений $P_{уд}$ не превышает 0,5 кгс, а разброс значений $T_{хл}$ укладывается в погрешность измерения.

Видно, что температура хлопка сегмента (рис.6) с ударом о препятствие стабилизируется в интервале $75-76^\circ\text{C}$, при неизменной силе удара 13,4-13,6 кгс. Полученные данные свидетельствуют о большей устойчивости сегментов из эквиатомного никелида титана по сравнению со сплавами TiNi, обогащенных никелем.

Вылеживание сферических сегментов при температурах ($4\pm 1^\circ\text{C}$) характеризуется монотонным снижением силы удара при незначительном изменении температуры прощелкивания с хлопком (рис.7). Такое поведение сферического сегмента при вылеживании можно связать с выделением фазы Ni_4Ti_3 [10]. Авторы отмечают, что в окрестности выделений Ni_4Ti_3 , зарождающихся на межфазовой границе частица / матрица, развиваются когерентные напряжения, способствующие образованию R-фазы.



Рис.6. Зависимость силы удара ($P_{уд}$) сферического сегмента о силоизмеритель и температуры взрывного скачка сегмента с хлопком ($T_{хл}$) от длительности вылеживания при температуре $20\pm 2^\circ\text{C}$. Сплав Ti-50,0at%Ni

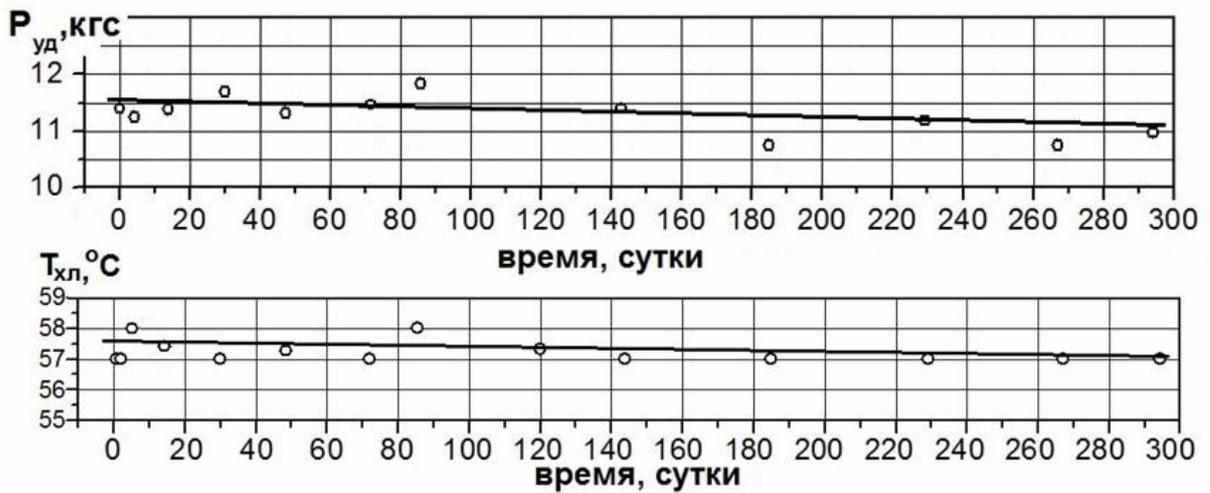


Рис.7. Зависимость силы удара сферического сегмента и $T_{хл}$ от длительности вылеживания при температуре $4 \pm 1^\circ\text{C}$. Сплав Ti-50,35at%Ni

R-фаза формируется вначале на межфазных границах, а затем в матрице, инициируя превращение $R \rightarrow B19'$. При нагреве реализуется обратный переход по типу $B19' \rightarrow B2$ аустенита. На рис.8 приведены диаграммы дифференциальной сканирующей калориметрии (DSC), полученные нами после прокатки с промежуточным нагревом до 600°C , 5 мин, и деформированных в прессформе с последующим отжигом при 420°C , 1,5 ч в заземленном (заневоленном) состоянии для задания формы и памяти.

Видно, что отжиг при 420°C , 1,5 ч, подобно старению, способствует формированию R-фазы и изменению последовательности мартенситного превращения. Если после прокатки и кратковременного отжига (600°C , 5 мин) прямое мартенситное превращение одностадийное $B2 \rightarrow B19'$ (рис.8а), то после отжига (420°C , 1,5 ч) мартенситное превращение реализуется через R-фазу по схеме $B2 \rightarrow R \rightarrow B19'$ (рис.8б). Известно [11], что образование R-фазы в никелиде титана благоприятствует обратимости деформации памяти формы. Данное обстоятельство обусловлено усилением эффекта

пластичности превращения при деформировании сегмента в мартенсите и формированием обратной деформации памяти формы мартенситного типа. В результате сегмент будет деформироваться за счет реализации пластичности превращения, а при нагреве после вылеживания будет восстанавливать форму вследствие эффекта памяти формы. Однако возврат сегмента скачком будет реализован только при определенном соотношении геометрических размеров. Нами экспериментально установлен интервал оптимальных значений $D/R = 0,75-0,85$ и $h/R = 0,02-0,024$ при $h = 0,45-0,48$ мм, при которых всегда реализуется взрывной скачок сегмента с хлопком к исходной форме. А при наличии препятствующего тела — с ударом максимальной силы. На рис.9 приведена зависимость силы удара и температуры хлопка сферического сегмента оптимальной геометрии ($D/R = 0,75$, $h/R = 0,02$), от длительности вылеживания. Видно, что сила удара и температура хлопка при длительности вылеживания в термостатирующей камере $(-15) \pm 2^\circ\text{C}$ в течение 280 суток практически не изменяется.

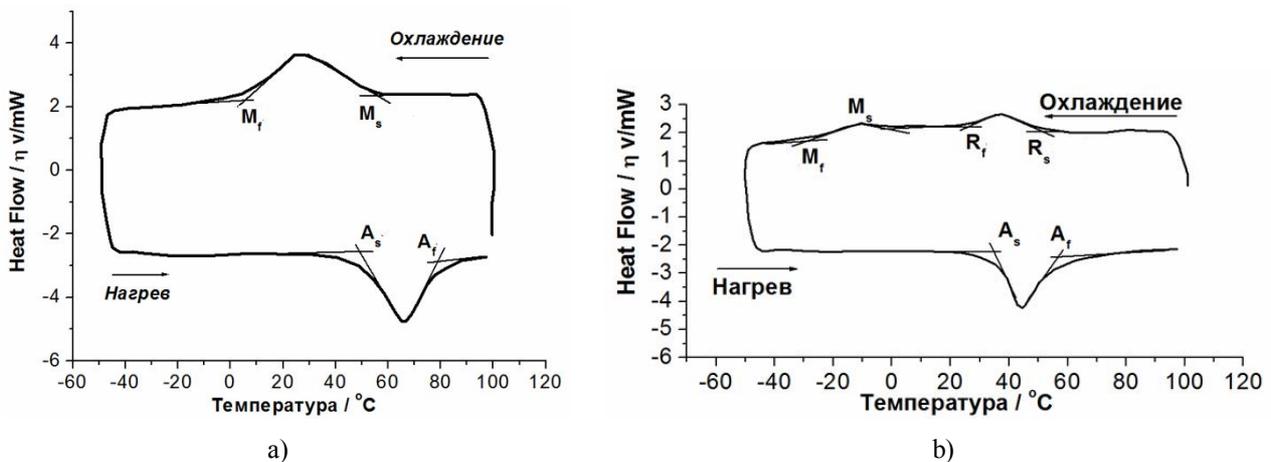


Рис.8. DSC после прокатки с промежуточным отжигом (600°C , 3 мин) (а); DSC деформированного сегмента в прессформе с последующим отжигом (420°C , 1,5 ч) в заневоленном состоянии (б)



Рис.9. Зависимость силы удара сферического сегмента ($P_{уд}$) о препятствие (силоизмеритель) и $T_{хл}$ от длительности вылеживания при температуре $(-15) \pm 2^\circ\text{C}$. Сплав Ti-50,0at%Ni

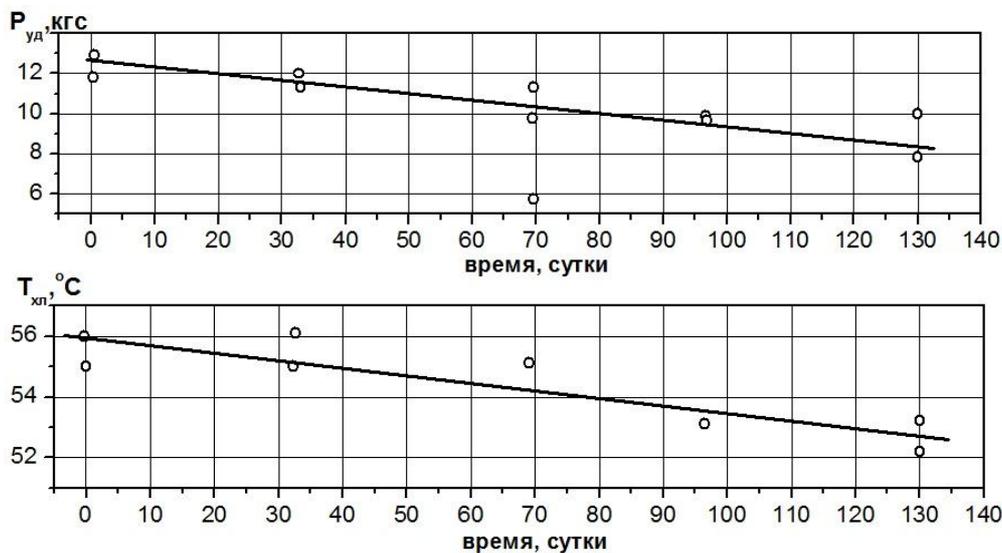


Рис.10. Зависимость силы удара сферического сегмента ($P_{уд}$) о препятствие (силоизмеритель) и $T_{хл}$ от длительности вылеживания при температуре $(-15) \pm 2^\circ\text{C}$. Сплав Ti-50,35at%Ni

Кривые на рис.10 демонстрируют однозначное снижение силовой характеристики и температуры хлопка.

Опыт показывает, что усилие, необходимое для деформирования (прогиба) сегмента в мартенсите с радиусом кривизны ≤ 19 мм, превышает фазовый предел текучести. В результате развивается дислокационная пластичность, которая приводит к накоплению необратимой деформации. Вследствие этого уменьшается эффект памяти формы и силовые характеристики не реализуются в полной мере. Особый интерес вызывает устойчивость к обратимому формоизменению сферических сегментов с ударом о препятствие после предварительного срабатывания в зажимном устройстве при $T_{пу}$ с последующим вылеживанием. В данном опыте сферический сегмент после срабатывания остается в стесненном (защемленном) состоянии. В этих условиях возможна релаксация реактивных сил, развивающихся в материале сегмента, вследствие инициирования каналов фазовой пластичности по реакции $B2 \rightarrow B19'$.

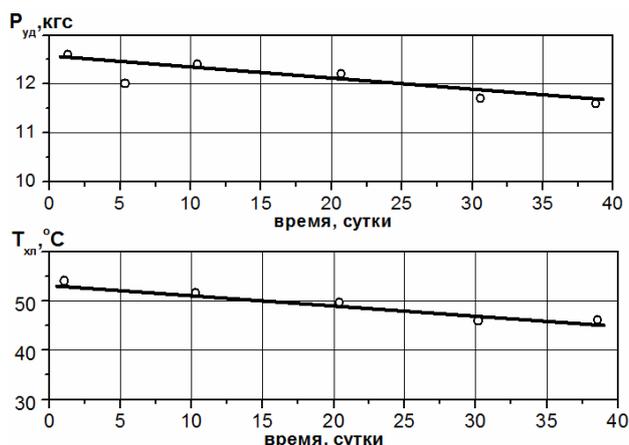


Рис.11. Зависимость силы удара и температуры хлопка сферического сегмента от длительности вылеживания при $4 \pm 1^\circ\text{C}$ в стесненном состоянии (после срабатывания в прессформе). Сплав Ti-50,35at%Ni

К особенностям формоизменения сегментов при вылеживании в зажимном устройстве, в стеснен-

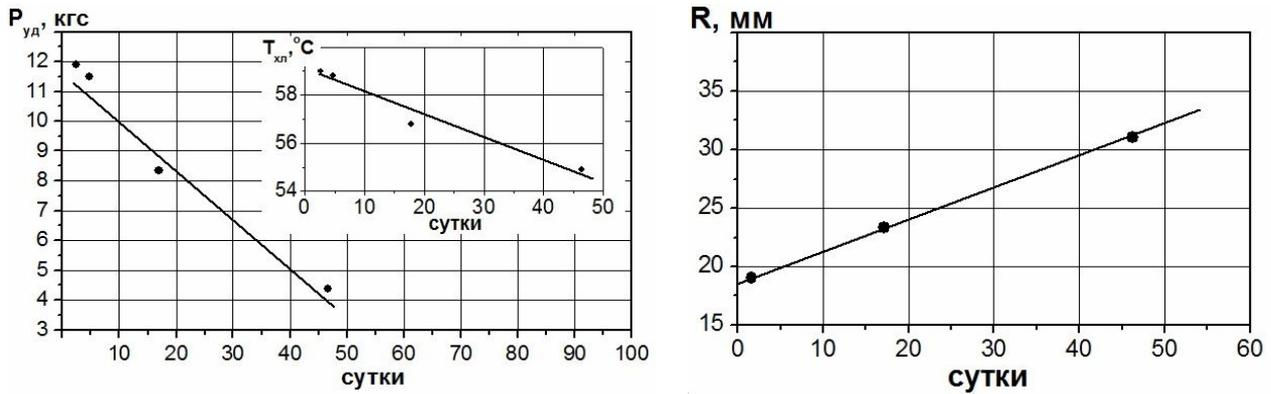


Рис. 12. Зависимости $P_{уд}$, $T_{хл}$ и радиуса кривизны (R) сферического сегмента от длительности вылеживания при температуре $(-15) \pm 2^\circ\text{C}$ в стесненном состоянии после предварительного срабатывания в прессформе. Сплав Ti-50,35at%Ni

ном состоянии, следует отнести образование вмятины на поверхности купола от препятствующего тела (силоизмерителя) после длительного вылеживания в запертом состоянии. После отогрева сферическая форма сегмента восстанавливается. При последующем прогибе в мартенсите зеркально исходной форме и нагреве до $T_{пв}$ реализуется скачок сегмента с ударом о препятствующее тело. Однако после вылеживания сегмента при температуре $(-15) \pm 2^\circ\text{C}$ в стесненном состоянии радиус кривизны сегмента (R) возрастает синхронно со снижением силы удара и температуры скачка сегмента с хлопком (рис. 11).

Поэтому даже при незначительной по длительности выдержке при заданной температуре (47 суток) наблюдается заметное снижение силового параметра ($P_{уд}$) и $T_{хл}$ с увеличением радиуса кривизны (R) вследствие релаксации упругих напряжений. Обращает внимание также на то, что сила удара при температуре вылеживания $4 \pm 1^\circ\text{C}$ в стесненном состоянии снижается с меньшим темпом по сравнению с вылеживанием при отрицательной температуре $(-15) \pm 2^\circ\text{C}$. В то же время этот показатель не является определяющим, поскольку на основе многочисленных опытов установлено, что длительные выдержки при отрицательных температурах (мартенситном состоянии) способствуют обратимости деформации памяти формы. А если сегмент находится в напряженном (стесненном) состоянии, то в материале сегмента формируется многократнообратимая память формы, обеспечивающая гарантированное формоизменение при отогреве.

Основной причиной резкого снижения силового параметра ($P_{уд}$) и $T_{хл}$, надо полагать, является несоответствие соотношений D/R и h/R оптимальным. В частности, в опыте, изображенном на рис. 12, $D/R = 0,89$ и $h/R = 0,025$ при оптимальных значениях $D/R = 0,75-0,85$, $h/R = 0,02-0,024$.

Заключение

1. По результатам исследований установлено, что изменение силы удара и температуры хлопка сферических сегментов, отражающих взрывной характер памяти формы, связаны с их формоизменением при вылеживании.

2. Сферические сегменты с оптимальной геометрией отличаются стабильным формоизменением после длительного вылеживания при положительных и отри-

цательных температурах с генерацией силовых характеристик ($H_{отс}$, $P_{уд}$) максимально достижимых значений.

3. Показано, что полный возврат деформации памяти формы сферических сегментов после вылеживания наблюдается только в случае, когда отсутствует необратимая деформация, обусловленная технологией изготовления и геометрией сферических сегментов.

4. Исследования, выполненные в данной работе, способствовали уточнению оптимальных значений геометрических параметров сферических сегментов. Установлено, что при соотношениях $D/R = 0,73-0,85$, $h/R = 0,02-0,025$ и $h = 0,45-0,48$ мм всегда реализуется взрывной скачок сегмента с хлопком, а при наличии препятствия — с ударом максимальной силы.

1. Хусаинов М.А., Летенков О.В., Пазгалов А.В., Беляков В.Н. Исследование устойчивости мембран из никелида титана // Сб. докл. XXX Межресп. семинара «Актуальные проблемы прочности». Новгород, 16-19 мая 1994. Новгород, 1994. Ч.2. С.152-158.
2. Хусаинов М.А. Общие закономерности и некоторые особенности термомеханического поведения материалов с эффектом памяти формы // Вестник НовГУ. Сер.: Естеств. и техн. науки. 1995. №1. С.67-75.
3. Хусаинов М.А. Явление эффекта осесимметричного выпучивания круглых пластин // ЖТФ. 1997. Т.67. №6. С.118-126.
4. Хусаинов М.А. Сплавы никелида титана с памятью формы // Структура, фазовые превращения и свойства. Ч.1 / Под ред. В.Г.Пушина. Екатеринбург: УрО РАН, 2006. С.226-242.
5. Патент РФ на изобретение №2182272 от 24.07.2002. Запорный клапан-отсекатель / М.А.Хусаинов. Оpubл. 10.05.02. Бюл. №13. С.1-3.
6. Патент РФ на изобретение №2171937 от 27.01.2001. Термоклапан / М.А.Хусаинов, А.Г.Ларионов, О.А.Малухина, Б.Я.Тамбулатов. Оpubл. 10.08.01. Бюл. №22.
7. Патент РФ на изобретение № 2473000 от 20.01.2013. Термозапорный клапан / М.А.Хусаинов, О.В.Летенков, А.С.Баталов. Оpubл. 20.01.13. Бюл. №2.
8. Разов А.И. Стабильность функционально-механических характеристик сплавов на базе Ti-Ni и Cu-Zn-Al // Тр. междунар. семинара «Актуальные проблемы прочности», Витебск, 26-29 сентября 2000. Витебск, 2000. С.500-505.
9. Хусаинов М.А., Волнянская О.О., Андреев В.А. Влияние вылеживания на температуры срабатывания термочувствительного элемента с памятью формы // Вестник НовГУ. Сер.: Техн. науки. 2003. №23. С.24-29.
10. Michuta J., Somsen Ch., Yamny A., et al. Elementary martensitic transformation processes in Ni-rich NiTi // Acta materialia. 2006. V.54. P.3525-3542.
11. Лотков А.И., Гришков В.И. Никелид титана, кристаллическая структура и фазовые превращения // Известия вузов. Физика. Т.5. 1985. С.83-85.

Bibliography (Transliterated)

1. Khusainov M.A., Letenkov O.V., Pazgalov A.V., Beliakov V.N. Issledovanie ustoichivosti membran iz nikelida titana // Sb. dokl. XXX Mezhpresp. seminara «Aktual'nye problemy prochnosti». Novgorod, 16-19 maia 1994. Novgorod, 1994. Ch.2. S.152-158.
2. Khusainov M.A. Obshchie zakonomernosti i nekotorye osobennosti termomekhanicheskogo povedeniia materialov s efektom pamiati formy // Vestnik NovGU. Ser.: Estestv. i tekhn. nauki. 1995. №1. S.67-75.
3. Khusainov M.A. Iavlenie effekta osesimmetrichnogo vupuchivaniia kruglykh plastin // ZhTF. 1997. T.67. №6. S.118-126.
4. Khusainov M.A. Splavy nikelida titana s pamiat'iu formy // Struktura, fazovye prevrashcheniia i svoistva. Ch.1 / Pod red. V.G.Pushina. Ekaterinburg: UrO RAN, 2006. S.226-242.
5. Patent RF na izobretenie №2182272 ot 24.07.2002. Zapornyi klapan-otsekatel' / M.A.Khusainov. Opubl. 10.05.02. Biul. №13. S.1-3.
6. Patent RF na izobretenie №2171937 ot 27.01.2001. Termoklapan / M.A.Khusainov, A.G.Larionov, O.A.Malukhina, B.Ia.Tambulatov. Opubl. 10.08.01. Biul. №22.
7. Patent RF na izobretenie № 2473000 ot 20.01.2013. Termozapornyi klapan / M.A.Khusainov, O.V.Letenkov, A.S.Batalov. Opubl. 20.01.13. Biul №2.
8. Razov A.I. Stabil'nost' funktsional'no-mekhanicheskikh kharakteristik splavov na baze Ti-Ni i Cu-Zn-Al // Tr. mezhdunar. seminara «Aktual'nye problemy prochnosti», Vitebsk, 26-29 sentiabria 2000. Vitebsk, 2000. S.500-505.
9. Khusainov M.A., Volnianskaia O.O., Andreev V.A. Vliianie vylezhivaniia na temperatury sratyvaniia termochuvstvitel'nogo elementa s pamiat'iu formy // Vestnik NovGU. Ser.: Tekhn. nauki. 2003. №23. S.24-29.
10. Michuta J., Somsen Ch., Yamny A., et al. Elementary martensitic transformation processes in Ni-rich NiTi // Acta materialia. 2006. V.54. P.3525-3542.
11. Lotkov A.I., Grishkov V.I. Nikelid titana, kristallicheskaia struktura i fazovye prevrashcheniia // Izvestiia vuzov. Fizika. T.5. 1985. S.83-85.