
**НАДЕЖНОСТЬ, ПРОЧНОСТЬ, ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ
МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ**

УДК 621.316.52: 669.24'295

УСТРОЙСТВО БЕЗОПАСНОСТИ НА ОСНОВЕ СПЛАВОВ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ© 2020 г. Н. Н. Попов^{1,*}, Д. В. Пресняков¹, В. Ф. Ларькин¹¹«Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики», Саров, Нижегородская обл., Россия

*e-mail: NNPopov@vniief.ru

Поступила в редакцию 03.12.2018 г.

Принята к публикации 31.01.2020 г.

Разработано устройство на основе сплавов с памятью формы, предназначенное для использования в изделиях машиностроения, в частности, в ядерной технике, с целью предотвращения аварийных ситуаций техногенного и природного характера. Устройство выполняет функцию разрыва электрической цепи при аварийном повышении температуры окружающей среды выше допустимой путем перерезания электрического жгута.

Ключевые слова: устройство безопасности, рабочий элемент, сплавы с памятью формы, Ti–Ni–Nb, Ti–Ni–Nb–Zr

DOI: 10.31857/S0235711920030104

В настоящее время в Российской Федерации создаются новые реакторные установки на быстрых нейтронах [1]. Учитывая сложность и опасность реакторных установок, последние должны оснащаться дополнительными устройствами безопасности, в том числе предназначенными для перерезания электрического жгута при аварийном повышении температуры окружающей среды выше допустимой.

В литературе приведено много информации о перерезающих устройствах [2–12]. Недостатками известных изобретений является сложность их конструкции, необходимость дистанционного управления и недопустимость использования порохов в ряде изделий машиностроения.

Поэтому для устранения перечисленных недостатков, нами разработано устройство безопасности, обеспечивающее разрыв электрической цепи путем перерезания электрических жгутов при повышении температуры окружающей среды выше допустимой с использованием привода на основе тарельчатых деталей, изготовленных из сплавов с памятью формы (СПФ) с широким мартенситным гистерезисом. Устройство имеет упрощенную конструкцию, обладает меньшими габаритами и массой, обеспечивает возможность проверки температуры аварийного срабатывания как перед постановкой устройства в изделие машиностроения, так и в процессе его эксплуатации [13].

В настоящей статье описана конструкция предложенного устройства безопасности и приведены результаты исследований по отработке его работоспособности.

Описание устройства безопасности на основе сплавов с памятью формы. На рис. 1 схематично изображена конструкция перерезающего устройства.

Для обеспечения работоспособности устройства необходимо на опорную пластину 9 положить электрический кабель 11, часть кабеля 11 закрыть основанием 8. Электрический кабель 11 должен лежать в канавке, которая выполнена в основании 8. Основание 8 жестко соединяется с пластиной 9 винтами 12. В резьбовую часть основа-

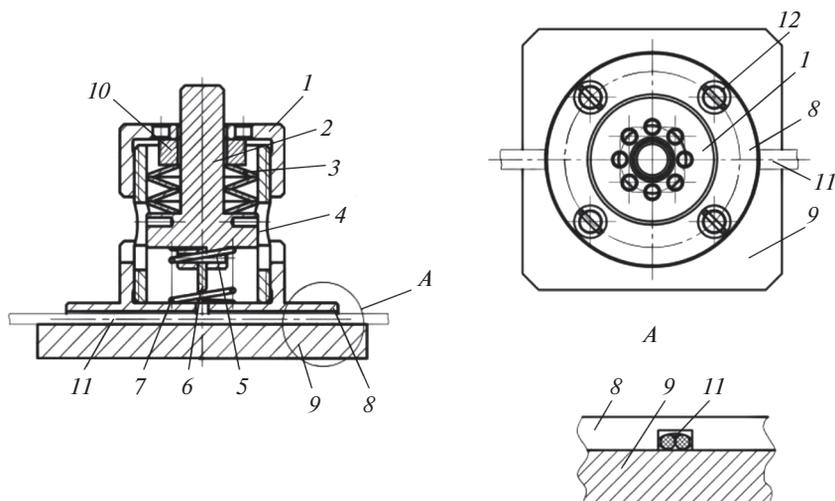


Рис. 1. Схема макета устройства безопасности на основе сплава с памятью формы.

ния 8 вкручивается корпус 4 , который имеет отверстия для подвода тепла к термочувствительным элементам 3 данного устройства. Далее нож 6 при помощи штифта 5 соединяется с поршнем 2 , который в свою очередь устанавливается в корпус 4 , таким образом, чтобы лезвие ножа 6 находилось перпендикулярно электрическому кабелю 11 . Нож 6 изготовлен из токонепроводящего материала. Далее на поршень 2 надеваются тарельчатые термочувствительные элементы 3 , которым перед установкой в устройство задается в мартенситном состоянии деформация сжатием. На резьбовую часть корпуса 4 накручивается крышка 1 , в которой также выполнены отверстия для подвода тепла к термочувствительным элементам 3 . При повышении температуры до пороговых значений термочувствительные элементы 3 , изготовленные из СПФ, начинают восстанавливать свою первоначальную форму и, разжимаясь, преодолевая сопротивление пружины 7 , толкают вниз поршень 2 с ножом 6 . Лезвие ножа 6 упирается в электрический кабель 11 и перерезает его. Для увеличения хода или усилий термочувствительных элементов 3 перерезающего устройства вместо шайбы 10 , заполняющей свободное пространство, можно использовать дополнительный набор термочувствительных элементов 3 , изготовленных из СПФ, в зависимости от конкретных требований к устройству.

Исследование свойств формовосстановления термочувствительных тарельчатых деталей, изготовленных из сплавов с памятью формы. Тарельчатые детали изготавливали из сплавов систем Ti–Ni–Nb [14] партии № 193-11-п и Ti–Ni–Nb–Zr [15] партии № 252. После изготовления их подвергали вакуумному отжигу и проводили замеры исходной высоты H_0 . Затем на испытательной машине UTS-100K при температурах $T = (-60...-70)^\circ\text{C}$; $(-100...-110)^\circ\text{C}$ и 23°C деталям навели деформацию сжатием со скоростью деформации $\dot{\epsilon} \approx 4.8 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ до величины усилия $F = 20 \text{ кН}$. Далее измеряли высоту деталей $H_{\text{д}}$ после деформации и нагревали до температуры $T = (85-90)^\circ\text{C}$ для определения их термомеханических характеристик (ТМХ). При нагреве тарельчатые детали восстанавливали исходную форму – наблюдалось проявление эффекта памяти формы (ЭПФ). Измеряли высоту деталей $H_{\text{ЭПФ}}$ после нагрева.

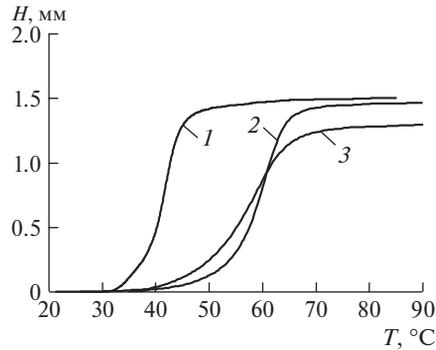


Рис. 2. Типичные диаграммы формовосстановления тарельчатых деталей, изготовленных из сплава Ti–Ni–Nb после предварительно наведенной деформации сжатием со скоростью $\dot{\epsilon} \approx 4.8 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ при разных температурах: 1 – $T = (-60 \dots -70)^\circ\text{C}$; 2 – $T = (-100 \dots -110)^\circ\text{C}$; 3 – $T = 23^\circ\text{C}$.

По диаграммам формовосстановления тарельчатых деталей (рис. 2) определяли характеристические температуры $A_{s\text{ЭПФ}}^H$ и $A_{f\text{ЭПФ}}^K$, соответственно, на начальной и конечной стадии всего этапа формовосстановления при проявлении ЭПФ. Методом касательных определяли характеристические температуры $A_{s\text{ЭПФ}}$ и $A_{f\text{ЭПФ}}$ (характеризуют основное формовосстановление внутри диапазона температур $A_{s\text{ЭПФ}}^H$, $A_{f\text{ЭПФ}}^K$) и рассчитывали температурный интервал $|A_{s\text{ЭПФ}} - A_{f\text{ЭПФ}}|$. Величину термически обратимой деформации $\varepsilon_{\text{ЭПФ}}$ и степень восстановления формы $\eta_{\text{ЭПФ}}$ при проявлении ЭПФ определяли по формулам (1) и (2), соответственно

$$\varepsilon_{\text{ЭПФ}} = \frac{\Delta H_{\text{ЭПФ}}}{H_0} \times 100\%; \quad (1)$$

$$\eta_{\text{ЭПФ}} = \frac{\Delta H_{\text{ЭПФ}}}{H_0 - H_d}, \quad (2)$$

где $\Delta H_{\text{ЭПФ}} = H_{\text{ЭПФ}} - H_d$.

Полученные результаты представлены в табл. 1, из которой следует, что тарельчатые детали сработали на величину $\Delta H_{\text{ЭПФ}} = (1.3\text{--}1.7)$ мм, что составило (37.1–48.6)% от ее высоты H_0 до деформации, при этом значение $\eta_{\text{ЭПФ}}$ составило 0.76–0.92. Увеличение температуры деформации от $(-100 \dots -110)^\circ\text{C}$ до 23°C тарельчатых деталей, изготовленных из сплава Ti–Ni–Nb, приводит к снижению величины термически обратимой деформации $\varepsilon_{\text{ЭПФ}}$, степени восстановления формы $\eta_{\text{ЭПФ}}$, высоты детали $\Delta H_{\text{ЭПФ}}$, температур начала основного формовосстановления $A_{s\text{ЭПФ}}$ и наоборот к повышению значений тех же величин (кроме $A_{s\text{ЭПФ}}$, которая понижается) в тарельчатых деталях, изготовленных из сплава системы Ti–Ni–Nb–Zr. Однако, значения величин, наиболее важных для разработанного устройства безопасности рабочих характеристик, таких как температура $A_{s\text{ЭПФ}}$, которая в устройстве характеризует температуру начала перерезания электрического жгута (температурой $A_{s\text{ЭПФ}}^H$ в данной конструкции устройства можно пренебречь, так как зазор между ножом и кабелем (0.6–0.7) мм, а величина перемещения ножа в интервале изменения температур от $A_{s\text{ЭПФ}}^H$ до $A_{s\text{ЭПФ}}$ составляет ≈ 0.15 мм), а также $\Delta H_{\text{ЭПФ}}$, которая в устройстве характеризует величину пе-

Таблица 1. Результаты исследований термомеханических свойств тарельчатых деталей, изготовленных из сплавов систем Ti–Ni–Nb и Ti–Ni–Nb–Zr при проявлении ЭПФ после предварительно наведенной деформации сжатием со скоростью $\dot{\varepsilon} \approx 4.8 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ при различных температурах

ТМХ	Ti–Ni–Nb			Ti–Ni–Nb–Zr	
	$T_D = (-100 \dots -110)^\circ\text{C}$	$T_D = (-60 \dots -70)^\circ\text{C}$	$T_D = 23^\circ\text{C}$	$T_D = (-60 \dots -70)^\circ\text{C}$	$T_D = 23^\circ\text{C}$
H_0 , мм	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
H_D , мм	1.8	1.75	1.8	1.95	1.65
$H_{\text{ЭПФ}}$, мм	3.25	3.25	3.1	3.25	3.35
$\Delta H_{\text{ЭПФ}}$, мм	1.45	1.5	1.3	1.3	1.7
$A_{\text{ЭПФ}}^H$, °C	36	31	32	27	26
$A_{\text{ЭПФ}}^K$, °C	87	83	89	79	67
$A_{\text{ЭПФ}}$, °C	54	38	49	45	38
$A_{\text{ЭПФ}}$, °C	65	45	66	58	54
$\varepsilon_{\text{ЭПФ}}$, %	41.4	42.9	37.1	37.1	48.6
$\eta_{\text{ЭПФ}}$	0.85	0.86	0.76	0.84	0.92
$ A_{\text{ЭПФ}}^H - A_{\text{ЭПФ}}^K $, °C	11	7	17	13	16

ремещения ножа, изменяются незначительно. С целью сокращения времени и упрощения процесса наведения деформации, было решено тарельчатые детали, изготовленные из сплава Ti–Ni–Nb, перед установкой в макет устройства безопасности деформировать при температуре $T_D = 23^\circ\text{C}$, а детали из сплава Ti–Ni–Nb–Zr в районе температуры $(-90 \dots -100)^\circ\text{C}$.

Определение усилия, необходимого для перерезания жгута. Усилие, необходимое для перерезания электрического жгута, определили в эксперименте с макетом устройства безопасности без рабочих элементов, изготовленных из СПФ. В результате эксперимента установлено, что максимальное усилие, необходимое для перерезания жгута, составило 175 Н, при этом ход рабочих элементов (соответствует величине перемещения ножа) должен быть не менее 2.2 мм. Учитывая тот факт, что ход одного рабочего элемента составляет (1.3–1.7) мм (табл. 1), а также принимая во внимание, что необходим дополнительный запас хода (преодоление зазора между ножом и жгутом величиной 0.6–0.7 мм), было решено использовать в разработанном устройстве безопасности четыре рабочих элемента (рис. 1).

Определение усилий, развиваемых рабочими элементами устройства безопасности. В первом эксперименте тарельчатым деталям, изготовленным из сплава Ti–Ni–Nb, навели деформацию сжатием при температуре $T_D = 23^\circ\text{C}$ до величины усилия $F = 20 \text{ кН}$; тарельчатым деталям, изготовленным из сплава Ti–Ni–Nb–Zr, при температуре $(-90 \dots -100)^\circ\text{C}$. Затем деформированные рабочие элементы устанавливали в макет устройства безопасности и проводили его сборку. При этом нож с поршнем не соединяли, а вместо этого поршень жестко заневоливали с помощью зажимов.

Во втором эксперименте определяли усилия, развиваемые рабочими элементами устройства безопасности при перерезании электрического жгута из двух кабелей марки КИМЭПМ. Макет устройства нагревали в печи VST 12/-/200 до температуры $T_D = 100^\circ\text{C}$. Усилия, развиваемые рабочими элементами, регистрировали по показаниям монитора управляющего компьютера испытательной машины UTS-100K. В результате исследований макета устройства безопасности с рабочим приводом, изготовлен-

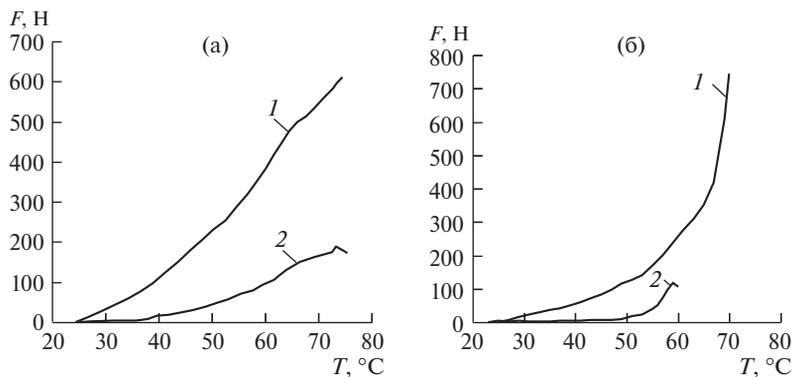


Рис. 3. Диаграммы зависимости усилий от температуры, развиваемых устройством безопасности в заневоленном состоянии и при резке жгута с термочувствительными тарельчатыми деталями, изготовленными из сплава Ti–Ni–Nb, деформированного при $T_D = 23^\circ\text{C}$ (а); и из сплава Ti–Ni–Nb–Zr, деформированного при $T_D = (-90\dots-100)^\circ\text{C}$ (б); 1 – в заневоленном состоянии; 2 – при резке жгута.

ным из сплава Ti–Ni–Nb, установлено, что максимальное усилие F_{\max} , развиваемое им в заневоленном состоянии, составляет 610 Н, а при перерезании электрического жгута 190 Н (рис. 3а). Выявлено, что данный макет устройства является работоспособным. Усилия, развиваемые тарельчатыми деталями при нагреве, возрастают, толкая нож дальше, и при температуре 74°C он полностью перерезает электрический жгут; перемещение ножа при перерезании составляет 2.9 мм, а ширина температурного интервала срабатывания 38°C .

У макета с рабочим приводом из сплава Ti–Ni–Nb–Zr выявлено, что максимальное усилие F_{\max} , развиваемое им в заневоленном состоянии, составляет 745 Н, а при перерезании электрического жгута 120 Н (рис. 3б). Установлено, что данный макет устройства является также работоспособным. Усилия, развиваемые тарельчатыми деталями, при температуре 60°C позволяют полностью перерезать электрический жгут; перемещение ножа при этом составляет 2.9 мм, а ширина температурного интервала срабатывания 28°C .

В результате экспериментов было установлено, что максимальное усилие F_{\max} , развиваемое тарельчатыми деталями из СПФ в процессе восстановления формы при нагреве в заневоленном состоянии, значительно превышает максимальные усилия перерезания электрического жгута, состоящего из двух кабелей марки КИМЭПМ. Показано, что конструкция макета устройства для перерезания кабеля является работоспособной, как с рабочим приводом в виде тарельчатых деталей из СПФ системы Ti–Ni–Nb, так и Ti–Ni–Nb–Zr, поскольку в процессе нагрева нож полностью перерезал электрический жгут.

Выводы. Описана конструкция устройства безопасности перерезающего типа, созданная на основе использования сплавов с памятью формы.

Исследованы свойства формовосстановления термочувствительных тарельчатых деталей, изготовленных из сплавов с памятью формы систем Ti–Ni–Nb и Ti–Ni–Nb–Zr. При выбранных размерах, величина формовосстановления составляет $\Delta H_{\text{ЭПФ}} = (1.3\text{--}1.7)$ мм. Увеличение температуры наведения деформации тарельчатым деталям из сплава Ti–Ni–Nb приводит к уменьшению термомеханических характеристик, а у деталей из сплава Ti–Ni–Nb–Zr к увеличению.

Установлено, что разработанная конструкция макета устройства для перерезания кабеля с рабочим приводом в виде тарельчатых деталей из сплавов с памятью формы систем Ti–Ni–Nb и Ti–Ni–Nb–Zr является работоспособной, поскольку нож полностью перерезает электрический жгут, состоящий из двух кабелей марки КИМЭПМ при нагреве макета до температуры (60–74)°С, величина перемещения ножа при этом составляет 2,9 мм.

Применение предлагаемого устройства позволяет отказаться от использования недопустимого в ряде областей машиностроения, в частности, в ядерной технике, порохового заряда для привода, отказаться от дистанционного управления, упростить конструкцию и обеспечить большую компактность устройства безопасности.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов Н.Н., Ларькин В.Ф., Пресняков Д.В., Гришин Е.Н., Сысоева Т.И., Морозова Т.А., Потемкин Г.А., Костылева А.А. Исследование свойств сплава 50Ti–40Pd–10Ni с высокотемпературным эффектом памяти формы // Ж. “Физика металлов и металловедение”. 2018. Т. 119. № 3. С. 303.
2. США Патент US6408951 В1. МПК В25D 11/10. Automatic cable-cutting apparatus (Автоматическое устройство для резания кабеля). Lin Pi-Chu. Заявка № US20010854584 от 14.05.2001. Оpubл. 25.06.2002.
3. Япония Патент JP3414997 В2. МПК В23D 29/02, В26В 13/06. Wire Cutter (Кусачки для резки проволоки). Toho Koki KK. Заявка № JP19970237332 от 02.09.1997. Оpubл. 09.06.2003.
4. Япония Патент JP3529514 В2. МПК В23D 23/00, В23D 33/02, В26D 7/02. Cable cutter. (Станок для отрезки электрического кабеля). Ishihara Kikai Kogyo KK. Заявка № JP19950274976 от 29.09.1995. Оpubл. 24.05.2004.
5. США Патент US6735870 В2. МПК В26В 17/00, G02В 6/44, В25F 1/00. Cutter for fiber optic cable and method of using same (Устройство для резки волоконно-оптического кабеля и способ использования устройства). Nordlin William F.; Greenlee Textron Inc. Заявка № US20010027141 от 20.12.2001. Оpubл. 18.05.2004.
6. США Патент US6766581 В2. МПК В23D 29/02, В25 В7/12, В26В 17/02, В26В 13/26. Cable cutter/crimper mechanism (Устройство для зажима и резки кабеля). Nordlin William F.; Greenlee textron Inc. Заявка № US20020079089 от 20.02.2002. Оpubл. 27.07.2004.
7. США Патент US6813981 В2. МПК В21F 11/00, H02G 1/00, В21F 13/00. Apparatus and method for cutting cables and wires (Устройство для резки кабелей и проводов). Urban Blake R., White Isaac D.M., Dickens James E., Forsberg Kevin, Sawyer Charles, Bellsouth intellectual property corporation. Заявка № US20020306995 от 30.11.2002. Оpubл. 09.11.2004.
8. США Патент US6779273 В1. МПК H02G 1/12. Coaxial cable cutting tool (Режущий инструмент для коаксиального кабеля). Lucent technologies Inc. Заявка № US20030400220 от 27.03.2003. Оpubл. 24.08.2004.
9. США Патент US6892460 В2. МПК В23D 29/02, В26В 17/00, В26D 3/16, G02В 6/00, G02В 6/25. Pliers-type tool and method for cutting through optical fibre cables (Зажимной инструмент и способ резки волоконно-оптических кабелей). Wilhelm Edgar, Holland-Moritz Georg, Bernd Tomas, Rennsteig Werkzeuge Gmbh. Заявка № US20030416955 от 16.05.2003. Оpubл. 17.05.2005.
10. Патент Японии № JP3825239 В2. МПК В21F 11/00, В23D 15/04, В23D 23/00, В23D 33/02. Wire rod coil cutting device (Устройство для резки толстого катушечного кабеля). Kobe steel Ltd. Заявка № JP20000276647 от 12.09.2000. Оpubл. 27.09.2006.
11. Патент ВОИС № WO2005023475 А1. МПК В23D 15/14, В23D 17/06, В23D 29/00, F42В 3/00. Tool for cutting cables (Инструмент для отрезки кабелей). Sb Produksjon As; Berg Svein. Заявка № WO2004NO00258 от 02.09.2004. Оpubл.: 17.03.2005.

12. Газизов Б.Г., Горбенко Д.В., Афанасьев В.А. Пороховой нож. РФ Патент 2287411, МПК В23D 15/14, В21F 11/00. Бюлл. № 32 от 20.11.2006 г.
13. Попов Н.Н., Белоусов Я.В. Перерезающее устройство. РФ Патент 2588963, МПК В21F 11/00, В26D 1/08, В26D 5/08. Бюлл. № 19 от 10.07.2016 г.
14. Попов Н.Н., Сысоева Т.И., Аушев А.А., Ларькин В.Ф., Костылева А.А. Исследование свойств сплава с памятью формы 45Ti–45Ni–10Nb в исходном литом и прессованном состоянии // Ж. “Металлы”. № 6. 2016. С. 59.
15. Попов Н.Н., Сысоева Т.И., Щедрина Е.В., Пресняков Д.В., Гришин Е.Н. Влияние видов термической обработки, величины и температуры наводящей деформации на характеристики проявления эффекта памяти формы в сплаве 43 Ti–46Ni–9Nb–2Zr // Ж. “Физика металлов и металловедение”. 2015. Т. 116. № 6. С. 652.