

---

---

**НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
В МАШИНОСТРОЕНИИ**

---

---

УДК 621.316.52:669.24'295

**УСТРОЙСТВО БЕЗОПАСНОСТИ НА ОСНОВЕ СПЛАВА  
С ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ**© 2023 г. Н. Н. Попов<sup>a,\*</sup>, Д. В. Пресняков<sup>a</sup>, А. А. Костылева<sup>a</sup><sup>a</sup>Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров, Нижегородская обл., Россия

\*e-mail: NNPopov@vniief.ru

Поступила в редакцию 25.05.2023 г.

После доработки 08.08.2023 г.

Принята к публикации 20.08.2023 г.

Разработано устройство на основе сплавов с высокотемпературной 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. Исследованы свойства формовосстановления термочувствительных рабочих элементов, изготовленных из сплава  $\text{Ni}_{49,5}\text{Ti}_{48,0}\text{Hf}_{2,5}$  с высокотемпературной памятью формы. Результаты проведенных экспериментов позволяют сделать вывод о возможности использования устройства в электрических системах для перерезания ножом жаростойких электрических кабелей с наружным диаметром  $d_{\text{out}} = 3.4\text{--}5.0$  мм и сечением медных проводов  $0.2\text{--}1.5$  мм<sup>2</sup> при аварийной ситуации, т.е. при превышении температуры окружающей среды от 100°C и максимальном нагреве до 200°C.

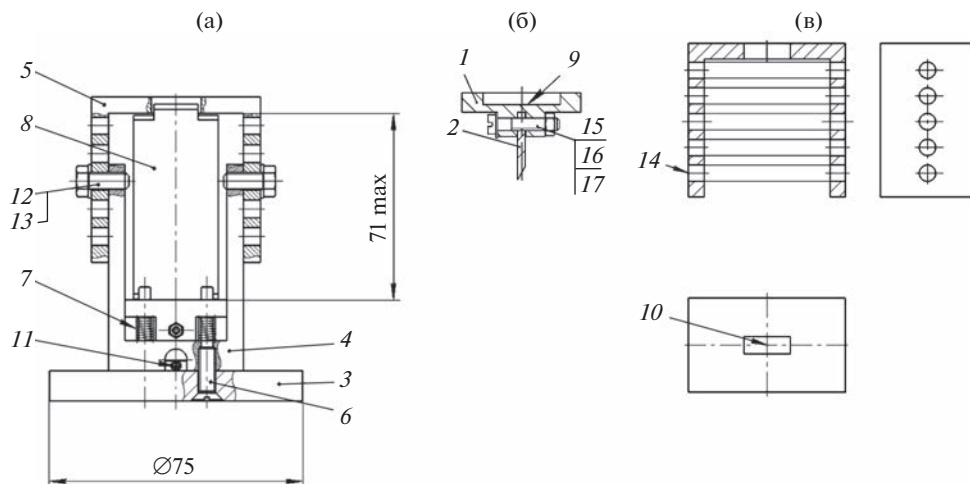
**Ключевые слова:** устройство безопасности, рабочий элемент, сплавы с памятью формы, Ti–Ni–Hf

**DOI:** 10.31857/S0235711923060147, **EDN:** EGDNOB

При создании устройств безопасности, предназначенных для объектов атомной энергетики, могут использоваться конструкции, в том числе основанные на применении сплавов с высокотемпературной памятью формы (СВПФ). Учитывая сложность и опасность объектов атомной энергетики, 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 [1–11]. Недостатками известных изобретений является сложность их конструкции, необходимость дистанционного управления и недопустимость использования порохов в ряде изделий машиностроения и, в частности, в ядерной технике. С целью устранения этих недостатков, ранее было разработано устройство, приведенное в [12]. Однако оно предназначено для температур не выше 100°C.

Поэтому для устранения всех перечисленных недостатков, разработано устройство безопасности (УБ), обеспечивающее разрыв электрической цепи путем перерезания электрических жгутов при повышении температуры окружающей среды выше 100°C, с использованием привода на основе изогнутых деталей, изготовленных из сплавов с



**Рис. 1.** Схема макета устройства безопасности на основе сплава с высокотемпературной памятью формы (а), (б); (в) – схема верхней стойки макета.

высокотемпературной памятью формы (СВПФ). 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 высокотемпературной памятью формы.** На рис. 1, схематично изображена конструкция перерезающего устройства. Для обеспечения работоспособности устройства размыкателя нож 2 с прижимом 1, у которого в верхней части имеется цилиндрический глухой паз 9 (рис. 1б), закрепляют при помощи винтового соединения 15, 16, 17. Основание 3 при помощи четырех винтов 6 соединяют с нижней стойкой 4. На верхнюю цилиндрическую часть винтов 6 устанавливают четыре пружины 7 и прижим 1 в сборе с ножом 2. Для получения термочувствительного рабочего элемента (РЭ) 8 (рис. 1а), предварительно термообработанной заготовки, изготовленной из СВПФ, в мартенситном состоянии наводится деформация изгибом. Затем рабочий элемент 8 в виде деформированной (изогнутой) пластины устанавливают в паз 9 прижима 1 и в паз 10 верхней стойки 5, а жаростойкий электрический кабель 11 – в паз нижней стойки 4. Нижнюю 4 и верхнюю 5 стойки соединяют при помощи болта 12 и шайбы 13. При нагреве до температуры реализации эффекта памяти формы, термочувствительный элемент 8 выпрямляется, преодолевая сопротивление пружин 7, и в качестве силового привода воздействует на прижим 1 с ножом 2.

Нож своей направленной вниз острой режущей кромкой перерезает жаростойкий электрический кабель 11 и упирается в основание 3. Для увеличения хода или усилий при перерезании ножом 2 кабеля 11 по бокам верхней стойки 5 делают отверстия 14 (рис. 1в), а на боковых сторонах нижней стойки 4 имеются отверстия с резьбой для соединения с верхней стойкой 5 болтовым соединением 12, 13. Это позволяет изменять рабочее пространство и использовать термочувствительные исполнительные элементы 8 различных размеров.

**Исследование свойств формовосстановления термочувствительных рабочих элементов, изготовленных из сплава с высокотемпературной памятью формы.** Термочувствительные рабочие элементы (ТРЭ) изготавливали из сплава  $\text{Ni}_{49.5}\text{Ti}_{48.0}\text{Hf}_{2.5}$ , ат. % (полосы, обозначенные изготовителем, как Э-17, Э-18), подобного ранее исследованному в [14] сплаву. Заготовки различной длины (30–68 мм) сечением  $9 \times 1.4$  мм отжигали в вакууме при  $T = 850^\circ\text{C}$ , 1 ч и охлаждали с печью. Далее им на испытательной машине навели деформацию изгибом при температуре  $T = 23^\circ\text{C}$  со скоростью движения траверсы  $V = 1$  мм/мин с использованием соответствующих матриц и пуансонов. Для определения термомеханических характеристик рабочих элементов оснастку с испытываемым рабочим элементом (без макета УБ) устанавливали в электрическую печь.

Величину наведенной заготовкам рабочих элементов деформации изгибом  $\varepsilon_b$  рассчитывали по формуле

$$\varepsilon_b = \frac{\tau}{2R_d} \times 100\%, \quad (1)$$

где  $\tau$  – толщина заготовки рабочего элемента;  $R_d$  – радиус кривизны рабочего элемента после наведения деформации изгибом.

В процессе формовосстановления рабочие элементы разгибались до определенного состояния, проявляя эффект памяти формы (ЭПФ) с определенными развиваемыми реактивными усилиями.

Величину остаточной деформации  $\varepsilon_{\text{res}}$  после формовосстановления рабочих элементов рассчитывали по формуле

$$\varepsilon_{\text{res}} = \frac{\tau}{2R_{sr}} \times 100\%, \quad (2)$$

где  $R_{sr}$  – радиус кривизны рабочего элемента после формовосстановления.

Величину ЭПФ рабочего элемента  $\varepsilon_{\text{SME WE}}$  рассчитывали по формуле

$$\varepsilon_{\text{SME WE}} = \varepsilon_b - \varepsilon_{\text{res}}. \quad (3)$$

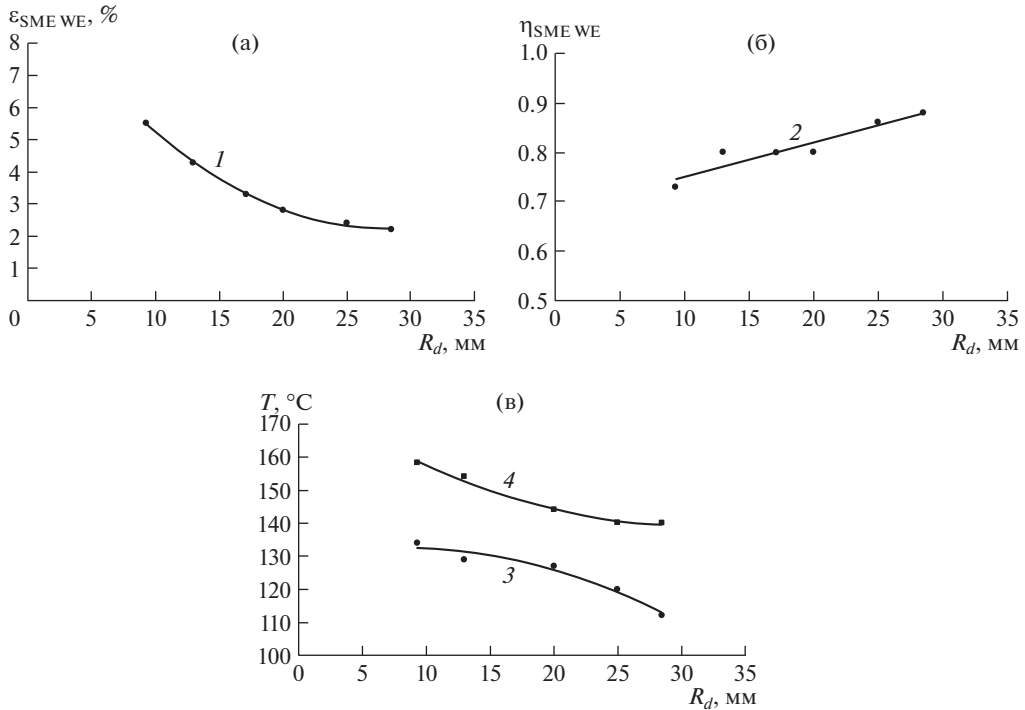
Степень восстановления формы рабочего элемента при проявлении ЭПФ  $\eta_{\text{SME WE}}$  определяли по формуле

$$\eta_{\text{SME WE}} = \frac{\varepsilon_{\text{SME WE}}}{\varepsilon_b} \times 100\%. \quad (4)$$

По результатам экспериментов строили диаграммы формовосстановления при нагреве (проявлении ЭПФ) рабочих элементов из СВПФ в координатах “ $\Delta H$ – $T$ ”, по которым методом касательных определяли температуры начала  $A_{\text{SME}}$  и окончания  $A_{\text{SME}}$  основного формовосстановления ТРЭ. Здесь  $\Delta H$  – величина изменения высоты рабочего элемента при формовосстановлении;  $T$  – температура нагрева.

Корреляционные зависимости величины эффекта памяти формы  $\varepsilon_{\text{SME WE}}$ , степени восстановления формы  $\eta_{\text{SME WE}}$  и температур основного формовосстановления  $A_{\text{SME}}$  и  $A_{\text{SME}}$  при проявлении ЭПФ (при нагреве до  $T = 200^\circ\text{C}$ ) от радиуса кривизны  $R_d$  рабочих элементов (заготовки РЭ различной длины 30–68 мм сечением  $9 \times 1.4$  мм), изготовленных из СВПФ  $\text{Ni}_{49.5}\text{Ti}_{48.0}\text{Hf}_{2.5}$ , ат. % (полосы Э-17, Э-18) и отожженных в вакууме ( $85^\circ\text{C}$ , 1 ч, охлаждение с печью), и после наведения им деформации изгибом (при  $T = 23^\circ\text{C}$ ,  $V = 1$  мм/мин) (без макета УБ) приведены на рис. 2.

По результатам проведенных экспериментов при нагреве до  $T = 200^\circ\text{C}$  для всех рабочих элементов (без макета УБ), изготовленных из СВПФ  $\text{Ni}_{49.5}\text{Ti}_{48.0}\text{Hf}_{2.5}$ , ат. % (полосы Э-17, Э-18) и отожженных в вакууме ( $850^\circ\text{C}$ , 1 ч, охлаждение с печью), установлено проявление ЭПФ; в заневоленном состоянии при нагреве в рабочих элементах развивались реактивные усилия; при увеличении начальной длины  $L$  заготовки РЭ от



**Рис. 2.** Зависимости величины эффекта памяти формы  $\epsilon_{SME WE}$  (а), степени восстановления формы  $\eta_{SME WE}$  (б) и температур основного формовосстановления  $A_{sSME}$  и  $A_{fSME}$  (в) при проявлении ЭПФ (при нагреве до  $T = 200^\circ\text{C}$ ) от радиуса кривизны  $R_d$  рабочих элементов: 1 –  $\epsilon_{SME WE} = 0.01R_d^2 - 0.53R_d + 9.6$ ,  $R^2 = 0.999$ ; 2 –  $\eta_{SME WE} = 0.007R_d + 0.68$ ,  $R^2 = 0.89$ ; 3 –  $A_{sSME} = -0.05R_d^2 + 0.8R_d + 129.4$ ,  $R^2 = 0.96$ ; 4 –  $A_{fSME} = 0.04R_d^2 - 2.5R_d + 178.7$ ,  $R^2 = 0.99$ .

30 до 68 мм и радиуса кривизны  $R_d$  РЭ от 9.3 до 28.5 мм после наведения деформации изгибом, соответственно, наблюдалось: 1) уменьшение величины наведенной деформации изгибом  $\epsilon_b$  от 7.5% до 2.5%; 2) для шести РЭ из заготовок сечением  $9 \times 1.4$  мм: уменьшение величины эффекта памяти формы  $\epsilon_{SME WE}$  от 5.5% до 2.2%; увеличение степени восстановления формы при проявлении ЭПФ  $\eta_{SME WE}$  от 0.73 до 0.88; увеличение максимального формовосстановления (изменения высот)  $\Delta H_{max}$  (за исключением РЭ № 3) от 4.51 до 10.24 мм; уменьшение температур  $A_{sSME}$  от  $134^\circ\text{C}$  до  $112^\circ\text{C}$  и  $A_{fSME}$  от  $158^\circ\text{C}$  до  $140^\circ\text{C}$  (за исключением РЭ № 3); колебание температурного интервала  $|A_{sSME} - A_{fSME}|$  в пределах от  $17^\circ\text{C}$  до  $28^\circ\text{C}$  (за исключением РЭ № 3); 3) для шести РЭ из заготовок сечением  $18 \times 1.4$  мм: уменьшение максимальных развиваемых реактивных усилий  $F_{max}$  от 290 до 149 Н; тенденция уменьшения температур  $A'_{sSME}$  от  $144^\circ\text{C}$  до  $135^\circ\text{C}$  и  $A'_{fSME}$  от  $183^\circ\text{C}$  до  $162^\circ\text{C}$ ; колебание температурного интервала  $|A'_{sSME} - A'_{fSME}|$  в пределах  $24\text{--}39^\circ\text{C}$ .

Выявлено, чем меньше радиус кривизны РЭ  $R_d$  после наведения деформации изгибом, тем больше значение наведенной деформации изгибом  $\epsilon_b$  и, соответственно,

**Таблица 1.** Максимальные усилия, необходимые для перерезания различных макетов жаростойких кабелей

| Наименование макета кабеля | а   | г   | д   | е   | ж   |
|----------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| $d_{\text{out}}$ , мм      | 2.3 | 4.2 | 4.4 | 5.0 | 5.2 |
| $F_{\text{max}}$ , Н       | 344 | 448 | 744 | 829 | 608 |

больше значение реактивных усилий  $F_{\text{max}}$ , развиваемых рабочими элементами в заневоленном состоянии при проявлении ЭПФ, но при этом меньше перемещения  $\Delta H_{\text{max}}$ , производимые рабочими элементами, и больше величина эффекта памяти формы  $\epsilon_{\text{SME WE}}$ .

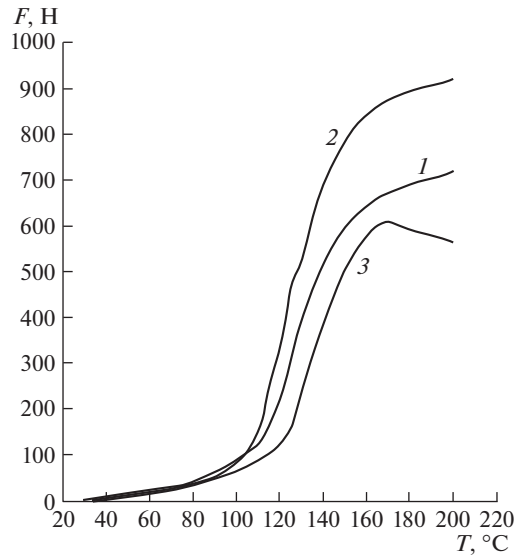
Отметим, что при наведении рабочему элементу деформации изгибом с меньшим радиусом кривизны  $R_d$  и, соответственно, при меньшей длине  $L$  заготовки РЭ может происходить растрескивание заготовки в процессе наведения ей деформации. Поэтому для наведения деформации изгибом выбирали длину  $L$  заготовки РЭ по максимальному значению радиуса кривизны  $R_d$ , а также по максимальному значению формовосстановления (изменения высот)  $\Delta H_{\text{max}}$ , которое должно быть больше наружного диаметра  $d_{\text{out}}$  перерезаемого электрического кабеля. Если, несмотря на более чем достаточную величину формовосстановления  $\Delta H_{\text{max}}$ , не хватает усилия для перерезания кабеля, то необходимо уменьшить радиус кривизны  $R_d$  и, соответственно, длину  $L$  заготовки РЭ, увеличив еще при этом значение  $\epsilon_{\text{SME WE}}$ .

На основании проведенных экспериментов оптимальным радиусом пуансона для наведения деформации изгибом заготовкам рабочих элементов, изготовленным из СВПФ системы Ni–Ti–Hf, целесообразно выбрать  $R' = 15$  мм.

**Определение усилий, необходимых для перерезания макетов жаростойких электрических кабелей.** Для исследования работоспособности макета УБ электрической системы определены усилия, необходимые для перерезания макетов жаростойких электрических кабелей. Для этого использовали 5 макетов кабелей. Получали на испытательной машине диаграммы усилий, развиваемых при перерезании макетов кабелей различного наружного диаметра  $d_{\text{out}}$ . По этим диаграммам были определены максимальные усилия  $F_{\text{max}}$ , при которых происходило перерезание различных макетов жаростойких электрических кабелей (падение усилий после достижения максимума) и которые необходимо учитывать в дальнейших экспериментах по исследованию работоспособности макета УБ электрической системы. Значения полученных результатов представлены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что чем меньше наружный диаметр  $d_{\text{out}}$  перерезаемого жаростойкого электрического кабеля, тем меньше усилия  $F_{\text{max}}$  для этого требуется; при этом макеты кабелей различны (оплетка, изоляция, количество и сечение медных проводов). Только для макета кабеля с  $d_{\text{out}} = 5.0$  мм усилие перерезания более чем на 200 Н больше, чем для макета кабеля с  $d_{\text{out}} = 5.2$  мм, видимо, из-за большего сечения медных проводов внутри кабеля.

**Исследование работоспособности макета устройства безопасности электрической системы с рабочими элементами, изготовленными из сплава  $\text{Ni}_{50.0}\text{Ti}_{47.5}\text{Hf}_{2.5}$ , ат.%.** Для опробования работоспособности макета УБ электрической системы перерезающего типа использовали рабочие элементы, изготовленные из полос Э-7-8, Э-7-11, Э-32 СВПФ  $\text{Ni}_{50.0}\text{Ti}_{47.5}\text{Hf}_{2.5}$ . Данные рабочие элементы использовали ранее в экспериментах по определению их термомеханических характеристик, причем рабочий элемент из полосы Э-7-8 – в экспериментах по определению характеристик его формовосстановления. Для повторного использования рабочие элементы вновь отжигали в вакуу-



**Рис. 3.** Диаграммы основных усилий  $F$ , развиваемых рабочими элементами из ВСПФ  $\text{Ni}_{50.0}\text{Ti}_{47.5}\text{Hf}_{2.5}$ , ат. % (полосы Э-7-8, Э-7-11, Э-32) после второго цикла отжига в вакууме ( $850^\circ\text{C}$ , 1 ч) и наведения деформации изгибом (при  $T = 23^\circ\text{C}$ ,  $V = 1$  мм/мин), в процессе перерезания ножом макетов кабелей с различным  $d_{\text{out}}$ , при нагреве от  $T = 30^\circ\text{C}$  до  $T = 200^\circ\text{C}$  в течение 5 мин: 1 – РЭ из полосы Э-7-8, макет кабеля с  $d_{\text{out}} = 3.4$  мм; 2 – РЭ из полосы Э-7-11, макет кабеля с  $d_{\text{out}} = 3.5$  мм; 3 – РЭ из полосы Э-32, макет кабеля с  $d_{\text{out}} = 5.0$  мм.

ме при  $T = 850^\circ\text{C}$ , 1 ч, охлаждение с печью, им вновь навели деформацию изгибом при температуре  $T = 23^\circ\text{C}$  со скоростью движения траверсы  $V = 1$  мм/мин с использованием соответствующих матриц и пуансонов. Для исследования работоспособности макета УБ электрической системы с рабочими элементами, изготовленными из полос Э-7-8, Э-7-11, Э-32 СВПФ  $\text{Ni}_{50.0}\text{Ti}_{47.5}\text{Hf}_{2.5}$ , ат. %, использовали три макета жаростойких электрических кабелей с наружным диаметром  $d_{\text{out}}$ , равным 3.4 мм, 3.5 мм, 5.0 мм. На рис. 3 приведены диаграммы усилий  $F$ , развиваемых рабочими элементами после второго цикла отжига в вакууме ( $850^\circ\text{C}$ , 1 ч) и наведения деформации изгибом (при  $T = 23^\circ\text{C}$ ,  $V = 1$  мм/мин), в процессе перерезания ножом макетов кабелей с различным  $d_{\text{out}}$ , при нагреве от  $T = 30^\circ\text{C}$  до  $T = 200^\circ\text{C}$  в течение пяти минут.

По диаграммам (рис. 3) методом касательных определены температуры начала  $A'_{\text{sSME}}$  и окончания  $A'_{\text{fSME}}$  развития основных усилий  $F$  рабочих элементов при перерезании ножом макетов кабелей, затем рассчитаны температурные интервалы  $|A'_{\text{sSME}} - A'_{\text{fSME}}|$ .

В табл. 2 представлены характеристики процесса перерезания ножом макетов кабелей в макете УБ с рабочими элементами, изготовленными из  $\text{Ni}_{50.0}\text{Ti}_{47.5}\text{Hf}_{2.5}$ , ат. % (полосы Э-7-8, Э-7-11, Э-32), после повторных циклов отжига в вакууме ( $850^\circ\text{C}$ , 1 ч, охлаждение с печью) и наведения деформации изгибом при температуре  $T = 23^\circ\text{C}$  и скорости движения траверсы  $V = 1$  мм/мин, при нагреве до температуры  $T = 200^\circ\text{C}$  в течение пяти минут.

В результате проведенных исследований установлено, что при нагреве от температуры  $T = 30^\circ\text{C}$  до  $T = 200^\circ\text{C}$  в течение пяти минут со средним темпом нагрева  $V_{\text{mean}} = 34.0^\circ\text{C}/\text{мин}$  у всех трех рабочих элементов, изготовленных из СВПФ

**Таблица 2.** Характеристики процесса перерезания ножом макетов жаростойких электрических кабелей с различным наружным диаметром  $d_{out}$  в макете УБ с рабочими элементами, изготовленными из СВФФ  $Ni_{50,0}Ti_{47,5}Hf_{2,5}$ , ат. % (полосы Э-7-8, Э-7-11, Э-32), после второго цикла отжига в вакууме ( $850^{\circ}C$ , 1 ч, охлаждение с печью) и наведения деформации изгибом (при  $T = 23^{\circ}C$ ,  $V = 1$  мм/мин), при нагреве от  $T = 30^{\circ}C$  до  $T = 200^{\circ}C$  в течение 5 мин

| Характеристики процесса перерезания     |                        |                        |                        |
|-----------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Полоса (РЭ)                             | Э-7-8                  | Э-7-11                 | Э-32                   |
| $\tau$ , мм                             | 1.65                   | 2.00                   | 2.30                   |
| $\epsilon_b$ , %                        | 3.8                    | 4.5                    | 5.2                    |
| $d_{out}$ , мм                          | 3.4                    | 3.5                    | 5.0                    |
| $A'_{sSME}$ , $^{\circ}C$               | 106                    | 103                    | 114                    |
| $A'_{fSME}$ , $^{\circ}C$               | 145                    | 144                    | 153                    |
| $ A'_{sSME} - A'_{fSME} $ , $^{\circ}C$ | 39                     | 41                     | 39                     |
| $F_{max}$ , Н                           | 719                    | 920                    | 610                    |
| Результат                               | Макет кабеля перерезан | Макет кабеля перерезан | Макет кабеля перерезан |

$Ni_{50,0}Ti_{47,5}Hf_{2,5}$ , ат. % (полосы Э-7-8, Э-7-11, Э-32), после второго цикла отжига в вакууме и наведения деформации изгибом, за счет проявления эффекта памяти формы развивались перемещения и максимальные реактивные усилия в пределах 610–920 Н, достаточные для того, чтобы нож, на который рабочий элемент воздействует в качестве силового привода, перерезал различные макеты жаростойких электрических кабелей с наружными диаметрами  $d_{out} = 3.4$ –5.0 мм и сечением медных проводов 0.2–1.5 мм<sup>2</sup>. При этом макеты кабелей были успешно перерезаны (при зафиксированном усилии  $F_{max}$ ), что определяли после охлаждения и разборки макета УБ электрической системы.

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

Исследованы свойства формовосстановления термочувствительных рабочих элементов, изготовленных из сплава с высокотемпературной памятью формы. При нагреве до  $T = 200^{\circ}C$  для всех рабочих элементов, изготовленных из СВФФ  $Ni_{50,0}Ti_{47,5}Hf_{2,5}$ , ат. % (полосы Э-17, Э-18) и отоженных в вакууме ( $850^{\circ}C$ , 1 ч, охлаждение с печью), установлено проявление ЭПФ; в заневоленном состоянии при нагреве в рабочих элементах развивались реактивные усилия; при увеличении начальной длины  $L$  заготовки РЭ от 30 до 68 мм и радиуса кривизны  $R_d$  РЭ от 9.3 до 28.5 мм после наведения деформации изгибом, соответственно, наблюдалось: 1) увеличение максимального формовосстановления (изменения высот)  $\Delta H_{max}$  от 4.51 до 10.24 мм; 2) уменьшение максимальных развиваемых реактивных усилий  $F_{max}$  от 290 до 149 Н.

Выявлено, что чем меньше радиус кривизны РЭ  $R_d$  после наведения деформации изгибом, тем больше значение наведенной деформации изгибом  $\epsilon_b$  и, соответственно, больше значение реактивных усилий  $F_{max}$ , развиваемых рабочими элементами в заневоленном состоянии при проявлении ЭПФ, но при этом меньше перемещения  $\Delta H_{max}$ , производимые рабочими элементами, и больше величина эффекта памяти формы  $\epsilon_{SME WE}$ .

Установлено, что при нагреве повторно использованных рабочих элементов макета, изготовленных из ВСПФ  $Ni_{50,0}Ti_{47,5}Hf_{2,5}$ , ат. % (полосы Э-7-8, Э-7-11, Э-32) до

$T = 200^{\circ}\text{C}$ , за счет проявления ЭПФ в них развивались перемещения и реактивные усилия, достаточные для перерезания ножом макетов жаростойких электрических кабелей с наружными диаметрами  $d_{\text{out}} = 3.4\text{--}5.0$  мм и сечением медных проводов  $0.2\text{--}1.5$  мм<sup>2</sup>. Результаты проведенных экспериментов позволяют сделать вывод о возможности использования макета УБ с рабочим элементом, изготовленным из СВПФ  $\text{Ni}_{50.0}\text{Ti}_{47.5}\text{Hf}_{2.5}$ , ат. % (даже после второго цикла отжига в вакууме и наведения деформации изгибом), в электрических системах для перерезания ножом жаростойких электрических кабелей с наружным диаметром  $d_{\text{out}} = 3.4\text{--}5.0$  мм и сечением медных проводов  $0.2\text{--}1.5$  мм<sup>2</sup> при аварийной ситуации, т.е. при превышении температуры окружающей среды от  $100^{\circ}\text{C}$  и максимальном нагреве до  $200^{\circ}\text{C}$ .

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Lin Pi.-Chu*. US Patent 6408951 B1, 2002.
2. *Toho Koki K.K.* JP Patent 3414997 B2, 2003.
3. *Kikai Kogyo K.K.* JP Patent 3529514 B2, 2004.
4. *Nordlin William F.* US Patent 6735870 B2, 2004.
5. *Nordlin William F.* US Patent 6766581 B2, 2004.
6. *Urban B.R., White I.D.M., Dickens J.E., Forsberg K., Sawyer C.* US Patent 6813981 B2, 2004.
7. *Clifton M.B., Pawlenko I., Samson L.* US Patent 6779273 B1, 2004.
8. *Wilhelm E., Holland-Moritz G., Bernd T.* US Patent 6892460 B2, 2005.
9. *Yasuhiko T., Tetsuro J.* JP Patent 3825239 B2, 2006.
10. *Berg S.* WO Patent 2005023475 A1, 2005.
11. Газизов Б.Г., Горбенко Д.В., Афанасьев В.А. РФ Патент 2287411, 2006 г.
12. Попов Н.Н., Пресняков Д.В., Ларькин В.Ф. Устройство безопасности на основе сплавов с памятью формы // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2020. № 3. С. 65.
13. Попов Н.Н., Пресняков Д.В. РФ Патент 2784182, 2022.
14. Попов Н.Н., Пресняков Д.В., Гришин Е.Н., Сысоева Т.И., Морозова Т.А., Глухарева С.В., Костылева А.А. Механические и термомеханические характеристики сплава  $\text{Ni}_{50}\text{Ti}_{47.5}\text{Hf}_{2.5}$  с высокотемпературным эффектом памяти формы // Материаловедение. 2023. № 4. С. 17.