

---

---

**НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ**

---

---

УДК 621.791.70

**ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ НЕРАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ  
ТРУБОПРОВОДОВ ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭФФЕКТА ПАМЯТИ ФОРМЫ  
В МУФТАХ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ**

© 2019 г. Д. У. Хасьянова\*

*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, г. Москва, Россия**\*e-mail: dinara.khasyanova@mail.ru*

Поступила в редакцию 02.05.2017 г.

Рассмотрен метод формирования внутреннего контура детали (муфты), который обеспечивает получение рельефных деталей различных размеров из сплавов с эффектом памяти формы за счет генерируемых напряжений термомеханического воздействия материала и придания заданной формы.

DOI: 10.1134/S0235711919010097

Обеспечение высокого качества машин в процессе эксплуатации за счет повышения надежности и герметичности комплектующих элементов, является одной из важнейших задач машиностроения. Одним из основных факторов обеспечения надежности является применение новых материалов, обладающих такими специфическими свойствами как сверхупругость, эффект памяти формы (ЭПФ), прочностные свойства и т.д.

При использовании таких материалов, качество изделий коренным образом зависит от уровня технологии, повышение которой можно достигнуть благодаря разработке и внедрению таких процессов, в которых участие человека ограничено и сводится главным образом к их управлению.

**Материалы с эффектом памяти формы в сплавах на основе TiNi.** Сущность такого материала заключается в сохранении деформированного состояния в одном температурном интервале, а при незначительном нагреве возвращении в исходное состояние. Восстановление исходных размеров способствует созданию внутри материала напряжений, превосходящих напряжения, приложенные в процессе деформирования. На основании этого явления, разработаны высокотехнологичные процессы, позволяющие самому материалу осуществлять восстановительные действия [1].

Высокие характеристики параметров сплавов с ЭПФ на основе TiNi (степень восстановления, развиваемые усилия, величина накопленной обратимой деформации при повышенной пластичности, высокая коррозионная стойкость) определяют перспективу его широкого применения в технике [2]. В табл. 1 представлен химический состав сплавов ТН1-К, обладающих ЭПФ на основе TiNi.

Научный подход к решению таких задач заключается в выяснении природы и механизмов проявления ЭПФ на основе глубоких исследований свойств материала. Наиболее эффективно применение таких сплавов для соединения трубопроводов, используемых во всех климатических условиях при давлении до 800 атм и температуре от  $-120^{\circ}$  до  $+250^{\circ}$  [3].

В настоящей статье рассмотрен новый способ формирования внутреннего профиля муфты сложной формы за счет эффекта памяти, который упрощает технологический

Таблица 1.

| Марка сплава | Химический состав, % |           |         |     |     |      |                |                |                |
|--------------|----------------------|-----------|---------|-----|-----|------|----------------|----------------|----------------|
|              | Ti                   | Ni        | Fe      | Co  | C   | Si   | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> |
|              | Не более             |           |         |     |     |      |                |                |                |
| ТН1-K        | Осн.                 | 50.0–53.5 | 2.5–4.5 | 0.2 | 0.1 | 0.15 | 0.2            | 0.05           | 0.013          |

процесс изготовления муфты из нитинола, исключает механическую обработку внутреннего контура детали и повышает качество надежности трубопроводов. Изготовление неразъемных соединений трубопроводов муфтами с “термомеханической памятью” позволяет получать соединения практически для любых сочетаний материалов и толщин труб [4]. Соединения, выполненные муфтами ТМС, образуются за счет значительного изменения размеров соединительного элемента при фазовых превращениях в материале муфты.

Основным элементом соединения трубопроводов является муфта, которая в конструктивном исполнении имеет сложный профиль по внутренней поверхности. Механическая прочность соединения образуется в зоне уплотняющих поясков (рис. 1), которые способны деформировать материал трубы до 6% в зависимости от предела текучести материала, диаметра и толщины соединяемых труб. Упругонапряженное состояние, которое образуется уплотняющими элементами, что способствует высокой герметичности соединения. [5]. В связи с низкой обрабатываемостью материала и требованием высокой точности по внутреннему контуру муфты, их изготовление вызывает значительные трудности. Особенно это важно для муфт диаметром менее 8 мм. Способность материала после деформации восстанавливать первоначальную форму позволяет разработать технологию формирования сложного профиля в деталях из этого материала в труднодоступных местах.

**Методика исследования.** Технология формирования сложного профиля в деталях осуществляется за счет перемещения, в заданном направлении, предварительно деформированного материала при восстановлении исходных размеров в процессе фазовых превращений [6].

Метод пластического самоформирования обеспечивает образование рельефных деталей различных размеров из сплавов с эффектом памяти формы за счет генерируемых напряжений термомеханического возврата материала, придания формы и рекристаллизации материала в жестких условиях на рельефной матрице, соответствующей требованиям к форме готовой детали.

В настоящей статье приведены результаты экспериментальных исследований и методика формирования внутренней резьбы  $M6 \times 0.25$  на гладкой поверхности втулки

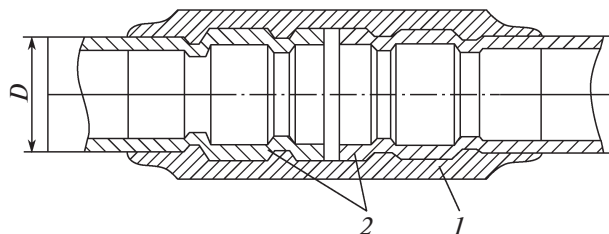


Рис. 1. Термомеханическое соединение с муфтой из металла с памятью формы. 1 – муфта; 2 – соединяемые трубопроводы.

Таблица 2

| Материал | Состав в ат% | $M_s, ^\circ\text{C}$ | $M_f, ^\circ\text{C}$ | $A_s, ^\circ\text{C}$ | $A_f, ^\circ\text{C}$ |
|----------|--------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Ti-Ni-Fe | Ti-47Ni-3Fe  | -90                   | -160                  | -72                   | -60                   |

из сплава ТН1-К для формирования сложного внутреннего профиля муфт. В табл. 2 представлен химический состав и температурные характеристики сплава ТН1-К [7].

Для изготовления муфты с резьбовым внутренним профилем использовали цилиндрическую заготовку втулки. При изготовлении внутренний диаметр образцов втулок составляет 0.92 от наружного размера резьбы. В качестве формирующего резьбу инструмента использовали резьбовой калибр с высокой чистотой поверхности и твердостью  $HRC > 65$  ед, представленный на рис. 2.

Втулки, после охлаждения ниже температуры мартенситного превращения подвергали дорнованию пуансоном, диаметр калибрующей части которого составлял 1.1 от наружного размера резьбы. После охлаждения, резьбовые калибры без усилий устанавливали в охлажденные деформированные втулки. Собранные резьбовой калибр и втулку подвергали нагреву выше температуры мартенситного превращения. Деформированный материал в мартенситной фазе в процессе превращения в аустенитную фазу стремится вернуться к исходному (недеформированному) состоянию и, встречая противодействие со стороны резьбового калибра, плотно облегает его поверхность. Для того, чтобы зафиксировать эту поверхность, осуществляется термическая обработка на “память формы” при температуре  $450\text{--}500^\circ\text{C}$  и при определенном времени нагрева в зависимости от толщины втулки [8].

После охлаждения ниже температуры мартенситного превращения резьбовой калибр с небольшим усилием выкручивался из втулки. Затем проводили визуальный контроль внутренней поверхности втулки для подтверждения того, что резьба сформирована.

В процессе эксперимента был получен микрошлиф со сформированной структурой внутренней резьбовой поверхности втулки, подтверждающий стабильное заполнение материала во впадины резьбового калибра при деформации до 6%. Микрошлиф сформированной структуры представлен на рис. 3.

**Технология формирования внутреннего профиля муфт.** На основании методики формирования внутренней резьбы  $M6 \times 0.25$  на гладкой поверхности втулки из сплава ТН1-К, была разработана технология формирования внутреннего профиля муфт, которая осуществляется по следующей схеме.

На рис. 4 представлены втулка-заготовка и комбинированная прошивка, с помощью которой формируется внутренний профиль. Втулка (рис. 4, а) из сплава ТН1-К изготавливается с внутренним диаметром на 0.92 от внутреннего диаметра ( $D$ ) готовой детали. Из высокопрочной стали, изготавливаются комбинированные прошивки (рис. 4,б), имеющие деформирующую часть и наружный контур, соответствующий зеркальному отображению внутреннего профиля муфты. Деформирующая часть вы-

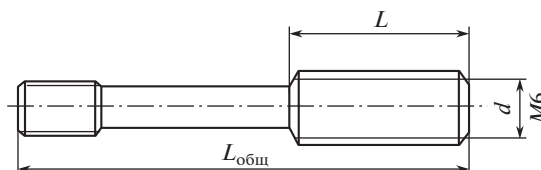


Рис. 2. Резьбовой калибр, формирующий резьбу:  $L_{\text{общ}}$  — общая длина калибра;  $L$  — длина рабочей части калибра;  $d$  — внутренний диаметр резьбы.

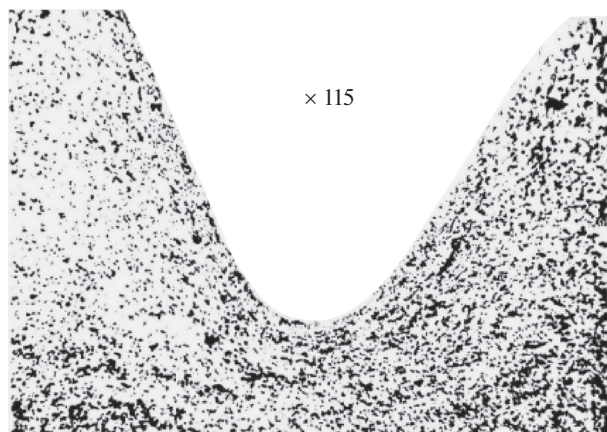


Рис. 3.

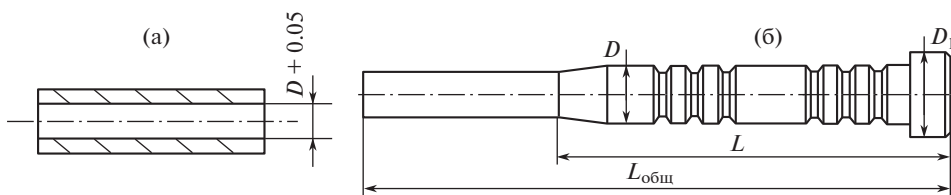


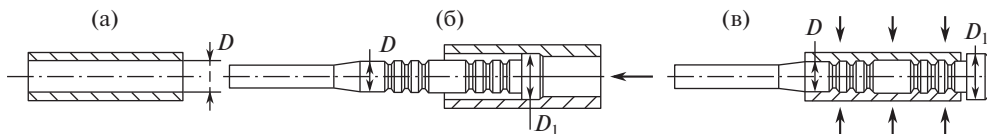
Рис. 4. Втулка-заготовка и комбинированная прошивка а – втулка-заготовка с гладким цилиндрическим каналом,  $D$  – диаметр втулки; б – комбинированная прошивка, формирующая внутренний профиль муфты,  $D_1$  – диаметр дорна,  $L_{\text{общ}}$  – общая длина прошивки,  $L$  – длина рабочей части прошивки.

полняет роль дорна при криогенных температурах, а профильная – для последующего формирования внутренней поверхности при высоких температурах. Она изготавливалась с высокой точностью и чистотой поверхности. На наружной поверхности прошивки создаются не только кольцевые проточки, но и продольные выемки, позволяющие формировать продольно-поперечные уплотнительные элементы муфты, позволяющие воспринимать крутящие моменты [7].

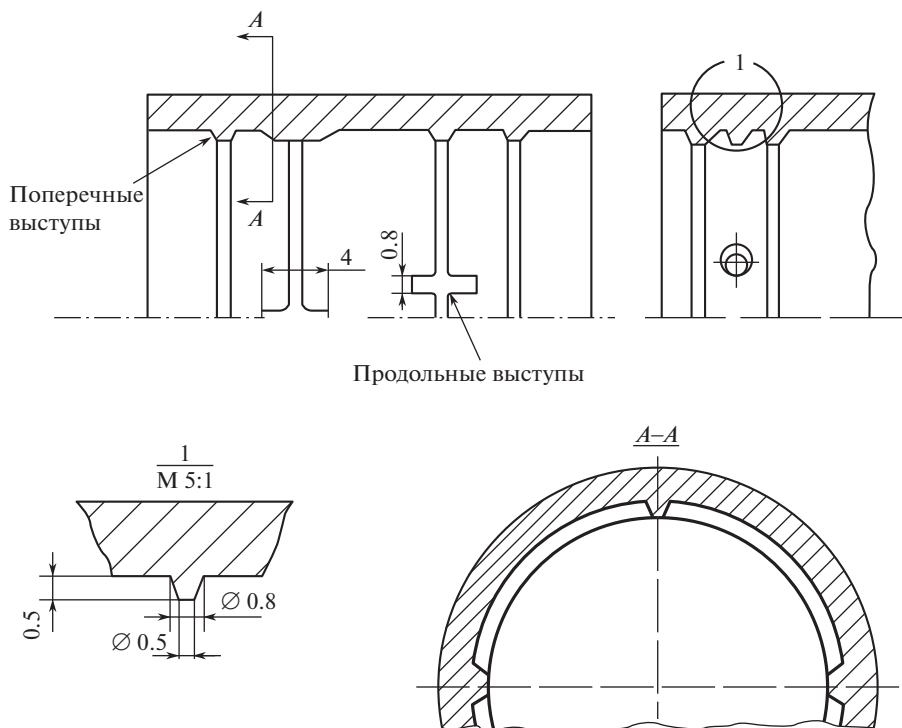
На рис. 5 показана технология формирования внутреннего контура муфты сложной формы. Втулка из TiNi, совместно с установленной в нее комбинированной прошивкой, охлаждается до температур жидкого азота (рис. 5, б). В специальном приспособлении комбинированная прошивка проталкивается до упора, а затем извлекается из приспособления (рис. 5, в). При нагреве, в результате фазовых превращений, материал втулки стремится вернуться к исходному (недеформированному) состоянию и заполняет проточки прошивки (рис. 5, в). Для того, чтобы материал муфты “запомнил” необходимый сформированный профиль, проводится термическая обработка. Термическая обработка партии втулок одного диаметра осуществляется в защитной среде по режиму  $500 + 20^\circ\text{C} - 4 \div 40$  мин в зависимости от диаметра муфты [9].

Для удаления прошивки, втулка с прошивкой в приспособлении охлаждается до температуры жидкого азота и внешним усилием выталкивается в обратном направлении. Затем втулка подвергается визуальному контролю. Прошивки можно многократно использовать для формирования втулок одного типоразмера.

**Обсуждение результатов.** По результатам экспериментальных исследований установлено, что внутренний профиль втулки соответствует внешним размерам прошивки



**Рис. 5.** Последовательность технологии получения внутреннего контура муфты сложной формы: а – втулка-заготовка с гладким цилиндрическим каналом; б – втулка-заготовка и комбинированная прошивка; в – втулка совместно с установленной в нее комбинированной прошивкой.



**Рис. 6.**

ки (рис. 3). Статистические данные показали, что для партии муфт в количестве 10 шт отклонение внутреннего диаметра составляет около 0.1%. Экспериментальные исследования показали возможность формирования любого профиля (поперечных и продольных выступов) внутренней поверхности деталей за счет конструкции инструмента (комбинированной прошивки). Ограничение по изменению формы размеров деталей из сплава TiNi составляет не более 10% от исходных размеров.

На рис. 6 показан пример профиля внутреннего контура муфты из сплава с эффектом памяти. В этом устройстве для соединения труб, содержащем цилиндрический корпус, уплотнительные элементы изготавливаются в осевом и радиальном направлении.

Результаты метода формирования внутренних поверхностей деталей из сплавов, обладающих ЭПФ, защищены патентом [6].

**Выводы.** По сравнению с существующим методом механической обработки внутреннего профиля деталей, новый метод позволяет сократить трудоемкость более чем в два раза и увеличить коэффициент использования материала в 2.5 раза [7].

Разработанная технология самоформирования внутренней поверхности муфт сложной формы позволяет получить детали различной конфигурации из металлов с эффектом памяти, например, в трубопроводах и других изделиях сложной формы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Фаткуллина Л.П.* Сплавы с памятью формы на основе никелида титана // Технология легких сплавов. 1990. № 4. С. 9–12.
2. *Khmelevskaya I., Prokoshkin S., Inaekyan K., Gurtovaya I., Korotitskiy A., Brailovski V., Demers V., Dobatkin S.* Functional properties of ti-ni-based shape memory alloys. Proceedings of the 3rd International Conference on Smart Materials, Structures and Systems – State-of-the-art Research and Application of SMAs Technologies 3rd International Conference on Smart Materials, Structures and Systems – State-of-the-art Research and Application of SMAs Technologies. CIMTEC 2008. Acireale, Sicily. 2008. С. 156–161.
3. *Пушин В.Г., Прокошкин С.Д., Валиев Р.З., Браиловский В., Валиев Э.З., Волков А.Е., Глезер А.М., Добаткин С.В., Дударев Е.Ф., Жу Ю.Т., Зайнулин Ю.Г., Колобов Ю.Р., Кондратьев В.В., Королев А.В., Коршунов А.И., Коуров Н.И., Кудреватых Н.В., Лотков А.И., Мейснер Л.Л., Попов А.А. и др.* Сплавы никелида титана с памятью формы / Под научной редакцией В.Г. Пушина. Институт физики металлов УрО РАН. Екатеринбург. 2006. Том Ч. 1 Структура, фазовые превращения и свойства. 439 с.
4. *Хасьянова Д.У.* Применение материалов с эффектом памяти формы для соединения трубопроводов в авиационной промышленности // Авиационная промышленность. 2016. № 3. С. 37–41.
5. *Шишкин С.В., Махутов Н.А.* Расчет и проектирование силовых конструкций на сплавах с эффектом памяти формы. Ижевск: Научно-издательский центр “Регулярная и хаотическая динамика”. 2007. 412 с.
6. *Хасьянов У., Виноградов А.В., Хасьянова Д.У., Виноградова М.А.* Способ формирования поверхности детали из сплава, обладающего эффектом памяти формы. Патент № 2375467. Б.И. 2009. № 12.
7. *Хасьянова Д.У.* Технологическое обеспечение качества изготовления муфт ТМС и сборки трубопроводов // Дисс. на соиск. уч. степ. к. т. н. Москва. МГУПИ, 2012. 103 с.
8. *Рыклина Е.П., Прокошкин С.Д., Чернавина А.А., Перевощикова Н.Н.* Исследование параметров Э.П.Ф. и О.Э.П.Ф., наведенных термомеханической тренировкой в сплаве Ti–Ni // Журнал функциональных материалов. 2008. Т. 2. № 2. С. 60–66.
9. *Хасьянова Д.У.* Особенность трения пары TiNi-сталь при криогенных температурах // Авиационная промышленность. 2011. № 4. С. 11.