

УДК 669.295'24'293:669/295'24'15:621.643.415

Разборные термомеханические соединения трубопроводов муфтами, изготовленными из сплавов с памятью формы систем Ti–Ni–Fe и Ti–Ni–Nb

Н. Н. Попов, В. Ф. Ларькин,
Д. В. Пресняков, А. А. Аушев,
Т. И. Сысоева, А. А. Костылева,
Е. Б. Суворова

Разработана опытная технология разборного термомеханического соединения трубопроводов муфтами, изготовленными из сплавов с памятью формы на основе никелида титана, легированного железом или ниобием. Исследованы свойства сплавов Ti–Ni–Fe и Ti–Ni–Nb: определены элементный и фазовый состав, изучена микроструктура, определены температуры фазовых превращений, механические и термомеханические характеристики. В данной технологии разборного термомеханического соединения трубопроводов диаметрами от 6 до 36 мм муфтами из сплавов Ti–Ni–Fe и Ti–Ni–Nb наиболее оптимальным является вариант с использованием эффекта обратимой памяти формы материала муфты. Показано, что использование муфт из сплава Ti–Ni–Nb предпочтительнее, чем из сплава Ti–Ni–Fe.

Одно из первых применений уникальных сплавов с памятью формы (СПФ) заключалось в изготовлении из них муфт, предназначенных для термомеханического соединения (ТМС) трубопроводов. Принцип термомеханического соединения трубопроводов и цилиндрических элементов конструкций заключается в следующем: из сплава с памятью формы изготавливают муфту с внутренним диаметром меньшим, чем диаметр соединяемых деталей трубопроводов. Далее при определенных температурно-скоростных условиях внутренний диаметр муфты расширяют дорнованием. Увеличенная в размерах муфта легко надевается на концы соединяемых деталей. При нагреве муфта восстанавливает свою первоначальную форму и обжимает концы трубопроводов, соединяя их со значительным усилием, при этом обеспечивается герметичное и прочное соединение.

Применение муфт из СПФ особенно эффективно при соединении трубопроводов для перекачки горючих и взрывоопасных продуктов. При использовании этой технологии исключается

использование открытого пламени, которое присутствует при газовой резке и сварке. По сравнению с традиционными соединениями сваркой, пайкой и др. такое соединение характеризуется надежностью, простотой и высокой скоростью монтажа, высокой вибрационной и коррозионной стойкостью, возможностью соединения труб из разных материалов и разных толщин, отсутствием зон термического влияния и электрического воздействия, абсолютной экологической и пожаро-взрывобезопасностью. В данной технологии отсутствует влияние «человеческого фактора» на качество соединения в процессе монтажа, который может быстро производиться работником, имеющим невысокий уровень квалификации. При ремонте объектов атомной энергетики и других отраслей промышленности такие соединения позволяют резко снизить влияние вредных факторов на здоровье ремонтного персонала благодаря короткому времени сборки (1–5 минут). Технология позволяет монтировать в заданном объеме большее количество трубопроводов по сравнению с другими видами соединений.

Для проведения ремонтных или регламентных работ выгодно иметь разборное термомеханическое соединение (РТМС). Поскольку сплавы с памятью формы – материалы достаточно дорогостоящие, то обеспечение разборности соединения позволит использовать муфту многократно.

Вопросы разработки технологии неразборного термомеханического соединения рассматривались в [1].

В традиционной технологии ТМС используются СПФ системы Ti–Ni–Fe. Однако муфты, изготовленные из этих сплавов, необходимо деформировать, хранить и устанавливать при криогенных температурах, что технологически неудобно. С целью преодоления этих недостатков и расширения мартенситного гистерезиса было предложено использовать легирование никелида титана ниобием, о чем подробно говорилось в [2, 3]. Подробный список зарубежных работ на эту тему приведен в работе [4]. В дальнейшем авторы данной работы всесторонне исследовали структуру, элементный и фазовый составы, механические и функциональные свойства сплавов системы Ti–Ni–Nb [5–8] и пришли к выводу, что наиболее предпочтителен сплав системы Ti–Ni–Nb в прессованном состоянии после отжига в вакууме, так как муфты, изготовленные из этого сплава, после дорнования (наведения деформации) можно хранить при температурах до 40 °С без потери наведенной им деформации [8].

В настоящей статье представлены результаты исследований по разработке технологии разборных термомеханических соединений трубопроводов муфтами, изготовленными из сплавов Ti–Ni–Fe и Ti–Ni–Nb с памятью формы.

Исследование свойств сплавов Ti–Ni–Fe и Ti–Ni–Nb с памятью формы. На основе литературных данных и результатов предыдущих работ для изготовления муфт, предназначенных для разборного термомеханического соединения трубопроводов, были выбраны два сплава на основе никелида титана, легированного железом или ниобием: сплав системы Ti–Ni–Fe марки ТН1К (ТУ 1-809-394-84) в виде прутков диаметром 40 мм (партия № 908; сплав системы Ti–Ni–Nb (атомная концентрация 45Ti–45Ni–10Nb, %) в литом состоянии в виде цилиндра диаметром 125 мм (партия № 1).

Для определения возможности изготовления муфт РТМС из выбранных сплавов были исследованы их элементный и фазовый состав, определены механические и термомеханические характеристики. Часть образцов исследуемых сплавов и изготовленные из них муфты подвергали термической обработке для снятия внутренних напряжений, возникающих в процессе их изготовления (отжиг), и улучшения механических и термомеханических характеристик (закалка).

Образцы и муфты из сплава Ti–Ni–Fe марки ТН1К при изготовлении подвергали двустадийному отжигу. Сначала заготовки под муфты и образцы отжигали в электропечи при температуре 500 °С в течение 60 мин, а затем образцы и муфты подвергали отжигу в вакууме при температуре 450 °С в течение 30 мин. Образцы и муфты, изготовленные из сплава Ti–Ni–Nb, сначала охлаждали в жидком азоте до –196 °С для реализации мартенситного превращения, а затем подвергали закалке в воде от 800 °С с выдержкой в течение 15 минут (образцы) и 30 минут (муфты).

Химический состав сплавов Ti–Ni–Fe и Ti–Ni–Nb по данным поставщиков и по результатам проведенного нами микрорентгеноструктурного анализа приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав сплавов Ti–Ni–Fe и Ti–Ni–Nb

Сплав	Атомная концентрация, %			
	Ti	Ni	Fe	Nb
Ti–Ni–Fe	Данные поставщика			
	49,7–49,8	47,3–47,4	2,9	–
	Данные микроструктурного анализа			
	51,4	45,8	2,8	–
Ti–Ni–Nb	Данные поставщика			
	45,0	45,0	–	10,0
	Данные микроструктурного анализа в исходном состоянии			
	46,4 ± 0,5	45,2 ± 0,8	–	8,1 ± 0,7
	Данные микроструктурного анализа после закалки сплава			
	46,1 ± 0,7	45,8 ± 1,0	–	7,7 ± 2,9

Исследование характера распределения «паразитной» фазы Ti₂Ni в сплаве Ti–Ni–Fe микроструктурным методом показало, что размер областей фазы Ti₂Ni находится в диапазоне 1–10 мкм (средний размер областей составляет 1,2–1,5 мкм), массовое содержание Ti₂Ni составляет 1–2 %.

По данным микроструктурного анализа структура сплава Ti–Ni–Nb состоит из зерен В2-фазы TiNi, по границам которых расположена эвтектика, представляющая чередование прослоек интерметаллида TiNi и твердого раствора на основе ниобия. В структуре также присутствуют (преимущественно по границам зерен TiNi) отдельные выделения твердого раствора на основе ниобия размером от долей до единиц микрон, а также включения Ti₂Ni, легированные Nb, размером 1–4 мкм и включения карбида титана TiC, легированные Nb, Ni, Ti, размером от единиц до десяти микрон.

Температуры фазовых превращений данных сплавов, определенная рентгеноструктурным методом, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Температуры фазовых превращений сплавов Ti–Ni–Fe и Ti–Ni–Nb

Сплав	M_s , °C	M_f , °C	A_s , °C	A_f , °C	T_R , °C
Ti–Ni–Fe в исходном состоянии	–150	<–196	–80	–50	–15
Ti–Ni–Nb в исходном состоянии	–60	–125	–50	10	–
Ti–Ni–Nb после закалки	–40	–100	–35	20	–

Примечание: M_s , M_f – температура начала и окончания прямого мартенситного превращения; A_s , A_f – температура начала и окончания обратного мартенситного превращения; T_R – температура образования R-фазы.

Для сплава Ti–Ni–Nb по сравнению с исходным состоянием в результате закалки наблюдается повышение температур фазовых превращений M_s , M_f , A_s , A_f и сужение ширины гистерезиса $|A_s - M_f|$.

В результате исследований фазовых превращений в сплаве Ti–Ni–Fe в исходном состоянии установлено, что мартенситные превращения в данном сплаве протекают по схеме B2 ↔ R ↔ B19'. При комнатной температуре сплав находится в однофазном состоянии B2; при температуре –196 °C – в двухфазном состоянии (R + B19'), при этом мартенситное превращение в нем не завершено, поэтому температура M_f для данного сплава ниже –196 °C.

Фазовый состав литого сплава Ti–Ni–Nb при комнатной температуре для образцов в исходном состоянии и после закалки одинаков: в сплаве содержатся две основные фазы – TiNi (B2), предположительно легированный ниобием, и Nb. Кроме того, в сплаве в небольшом количестве присутствует «паразитная» фаза Ti₂Ni, которая мало изменяется при дальнейшей обработке. В сплаве происходит одностадийное мартенситное превращение по типу B2↔B19', в интервале фазового перехода образование промежуточной R-фазы (с ромбоэдрической решеткой) не зарегистрировано.

Определены основные механические характеристики для сплавов систем Ti–Ni–Fe (после отжига) и Ti–Ni–Nb (в исходном состоянии и после закалки): фазовый предел текучести σ_{ϕ} , дислокационный предел текучести материала с памятью формы σ_T , предел прочности σ_B , относительное остаточное удлинение $\delta_{ост}$, относительное остаточное сужение $\psi_{ост}$, средние значения которых наряду со средними квадратическими отклонениями (СКО) и коэффициентами вариации $K_{вар}$ представлены в табл. 3.

Таблица 3

Средние значения основных механических характеристик сплавов с памятью формы систем Ti–Ni–Fe и Ti–Ni–Nb

Параметры статистической обработки	σ_{ϕ} , МПа	σ_T , МПа	σ_B , МПа	$\delta_{ост}$, %	$\psi_{ост}$, %
Ti–Ni–Fe в исходном состоянии (данные поставщика)					
Среднее	–	265	610	24	–
СКО	–	35,4	19,8	0,6	–
$K_{вар}$, %	–	13	3	2	–
Объем выборки	–	2	2	2	–
Ti–Ni–Fe после отжига					
Среднее	–	290	590	31	25
СКО	–	2,9	16,7	2,8	1,6
$K_{вар}$, %	–	1	3	9	6
Объем выборки	–	10*	11	11	11
Ti–Ni–Nb в исходном состоянии					
Среднее	220	640	690	7	–
СКО	2,9	24,3	33,7	0,6	–
$K_{вар}$, %	1	4	5	8	–
Объем выборки	3	3	3	3	–
Ti–Ni–Nb после закалки					
Среднее	205	640	690	10	–
СКО	36,0	36,1	54,0	1,5	–
$K_{вар}$, %	17	6	8	15	–
Объем выборки	3	3	3	3	–
Ti–Ni–Nb (объединенные значения, кроме $\delta_{ост}$)					
Среднее	215	640	690	–	–
СКО	24,5	27,5	40,3	–	–
$K_{вар}$, %	11	4	6	–	–
Объем выборки	6	6	6	–	–

Примечание: * – значение $\sigma_T = 299$ МПа (Ti–Ni–Fe после отжига) было отбраковано в результате проверки по критерию Смирнова для отбраковки резко выделяющихся результатов испытаний [9].

Результаты исследований показали, что для сплава Ti–Ni–Fe после отжига и для сплава Ti–Ni–Nb после закалки относительное остаточное удлинение увеличилось в 1,3 раза. Получено хорошее совпадение прочностных характеристик σ_T , σ_B для сплава Ti–Ni–Fe после отжига с данными поставщика, а также σ_f , σ_T , σ_B для сплава Ti–Ni–Nb в исходном состоянии и после закалки (в этом случае рассчитаны объединенные средние значения, СКО и $K_{вар}$). Следует отметить достаточно низкие значения $K_{вар}$ для выборок значений основных механических характеристик исследованных сплавов в исходном состоянии и после термообработки, что означает хорошую повторяемость результатов внутри выборок.

Для разработки РТМС трубопроводов муфтами, изготовленными из сплавов Ti–Ni–Fe и Ti–Ni–Nb с памятью формы, приемлемый комплекс основных механических свойств (прочностных, необходимых для достижения прочности и герметичности термомеханического соединения, и особенно пластических, необходимых для дорнования муфт без их растрескивания) можно получить с помощью соответствующей термической обработки.

Определены основные термомеханические характеристики для сплавов систем Ti–Ni–Fe (после отжига) и Ti–Ni–Nb (в исходном состоянии и после закалки):

- температура начала и окончания формовосстановления $A_s^{ЭПФ}$, $A_f^{ЭПФ}$ при проявлении эффекта памяти формы (ЭПФ);
- температура начала и окончания формоизменения $A_s^{ЭОПФ}$, $A_f^{ЭОПФ}$ при проявлении эффекта обратимой памяти формы (ЭОПФ) – термически обратимая деформация восстановления (изменения) $\varepsilon_{ЭПФ}$, $\varepsilon_{ЭОПФ}$ при отсутствии противодействия при проявлении ЭПФ и ЭОПФ соответственно;
- температура начала и окончания (A_s^σ , A_f^σ) интенсивного роста реактивных напряжений;
- максимальное реактивное напряжение σ_r^{\max} во время нагрева (в заневоленном состоянии) после наведения деформации.

Для сплава Ti–Ni–Fe характеристические температуры формовосстановления при проявлении ЭПФ увеличиваются с ростом наведенной деформации ε_p в диапазоне от 1 до 9 % в соответствии с линейной зависимостью: $A_s^{ЭПФ} = 2,8\varepsilon_p - 78$ (°C), $r = 0,66$; $A_f^{ЭПФ} = 1,9\varepsilon_p - 61$ (°C), $r = 0,6$, а $\varepsilon_{ЭПФ}$ и $\varepsilon_{ЭОПФ}$ – в соответствии с линейной зависимостью: $\varepsilon_{ЭПФ} = 0,92\varepsilon_p + 0,01$ (%), $r = 0,98$; $\varepsilon_{ЭОПФ} = 0,13\varepsilon_p + 0,47$ (%), $r = 0,8$ (r – коэффициент корреляции). Деформация при проявлении ЭПФ $\varepsilon_{ЭПФ}$ составляет ≈ 92 % от наведенной деформации. Измерения температуры $A_s^{ЭОПФ}$, $A_f^{ЭОПФ}$ показали их независимость (в пределах погрешностей измерений) от наведенной деформации растяжением ε_p . Например, для сплава Ti–Ni–Fe после отжига при $\varepsilon_p = 8$ % получены следующие значения термомеханических характеристик: $A_s^{ЭПФ} = -56$ °C, $A_f^{ЭПФ} = -46$ °C, $A_s^{ЭОПФ} = -80$ °C, $A_f^{ЭОПФ} = -55$ °C, $\varepsilon_{ЭПФ} = 7,4$ %, $\varepsilon_{ЭОПФ} = 1,5$ %.

Для литого сплава Ti–Ni–Nb (табл. 4) термообработка в виде закалки по сравнению с исходным состоянием несколько сместила температуру формовосстановления в область более высоких значений в зависимости от значения наведенной деформации: $A_s^{ЭПФ}$ – на 7 °C, а $A_f^{ЭПФ}$ – на 16 °C; при этом интервал формовосстановления $|A_s^{ЭПФ} - A_f^{ЭПФ}|$ увеличился на 9 °C. Если температура формовосстановления $A_s^{ЭПФ}$ на начальном этапе выше комнатной температуры, муфты, изготовленные

из данного сплава, после дорнования (наведения деформации) можно хранить при комнатной температуре без потери наведенной деформации до их использования.

Таблица 4

Средние значения термомеханических характеристик сплава Ti–Ni–Nb

$\epsilon_p, \%$	$A_s^{\text{ЭПФ}}, \text{ }^\circ\text{C}$	$A_f^{\text{ЭПФ}}, \text{ }^\circ\text{C}$	$A_s^\sigma, \text{ }^\circ\text{C}$	$A_f^\sigma, \text{ }^\circ\text{C}$	$\sigma_r^{\text{max}}, \text{ МПа}$
Ti–Ni–Nb в исходном состоянии					
6,5	36	57	–	–	–
Ti–Ni–Nb после закалки					
3	–	–	10	45	480
5	–	–	20	110	520
8	–	–	30	130	550
9	43	73	–	–	–

С увеличением наведенной деформации ϵ_p от 3 до 8 % температура начала и окончания интенсивного роста реактивных напряжений, развивающихся во время нагрева сплава Ti–Ni–Nb в за-неволенном состоянии, увеличивается (A_s^σ – на 20 °C, A_f^σ – на 85 °C); максимальное реактивное напряжение σ_r^{max} увеличивается на 70 МПа и достигает 550 МПа. Следовательно, во время сборки ТМС муфтами, изготовленными из сплава Ti–Ni–Nb, для достижения максимальных реактивных напряжений и полной реализации свойств памяти формы в сплаве (и получения ТМС с оптимальными герметичностью и несущей способностью) необходимо нагреть муфту выше температуры A_f^σ (130 °C) при наведенной деформации $\epsilon_p = 8 \%$.

Результаты исследований механических и термомеханических свойств сплавов на основе никелида титана, легированного железом или ниобием, использовали при разработке технологии РТМС трубопроводов.

Разработка технологии разборного термомеханического соединения трубопроводов. На этапе разработки РТМС рассматривали различные варианты конструкций. Одно из направлений было связано с использованием энергии дополнительного элемента, так называемого контртела, для демонтажа муфты при определенных условиях.

В варианте РТМС трубопроводов с использованием жидкостного контртела (рис. 1,а) использовано свойство воды расширяться при снижении температуры ниже 4 °C [1]. Для этого перед

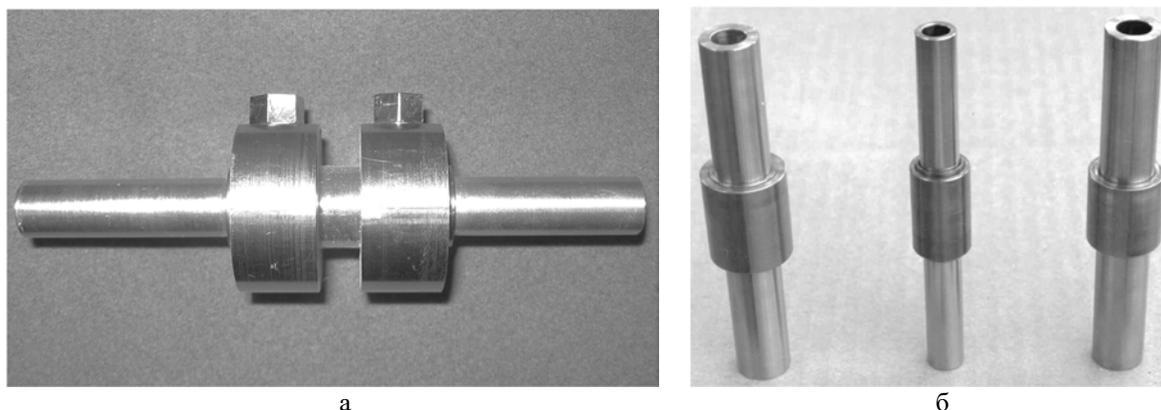


Рис. 1. Макет РТМС трубопроводов с использованием жидкостного (а) и металлического (б) контртела

сборкой ТМС в муфтах, изготовленных из сплава с памятью формы (например, Ti–Ni–Fe), выполняли цилиндрические полости для жидкостного контртела и наводили деформацию муфтам.

Разборность конструкции с использованием жидкостного контртела обеспечивали следующим образом. В полости заливали воду при комнатной температуре. Отверстия, через которые происходила заливка воды, герметично закрывали болтами с уплотнительными прокладками. Соединение охлаждали в жидком азоте, т. е. материал муфты находился при температуре $T < M_f$, а вода, находившаяся в теле муфты, при замерзании увеличивалась в объеме. При этом происходил отжим муфты от элементов трубопроводов, которые затем легко вынимались из муфты. Повторный процесс сборки позволил вновь получить прочное термомеханическое соединение.

В конструкции РТМС с использованием металлического контртела (рис. 1,б) [1] муфты изготавливали из сплава Ti–Ni–Fe, трубопроводы – из стали марки ХВГ, упругие втулки (контртелá) – из никелида титана марки ТН1. При сборке ТМС муфту после дорнования надевали на промежуточный элемент – втулку, имеющую на внутренней поверхности уплотняющие пояски, а втулку – на элементы трубопровода. Муфта, нагреваясь до комнатной температуры, проявляла ЭПФ и обжимала втулку, которая, деформируясь, внедрялась поясками в трубопроводы. Для разборки соединения формировали условия (например, воздействие температуры), когда упругие силы втулки превышали усилия от муфты; при этом втулка расширялась вместе с муфтой, и таким образом происходила разборка ТМС.

Разборность ТМС трубопроводов с использованием металлического контртела обеспечивали двумя способами. В первом случае деформация втулки, изготовленной из высокотемпературного сплава никелида титана марки ТН1, происходила при нагреве РТМС до комнатной температуры. Поскольку при этом она находилась в мартенситном состоянии, то сохраняла возможность восстановления формы при нагреве выше температуры A_f . При нагреве макета РТМС до 190 °С соединение ослабло и концы трубопроводов легко вышли из втулки. Во втором случае макеты после сборки охлаждали до температуры жидкого азота (–196 °С). Поскольку сплав ТН1К данного химического состава обладал достаточным эффектом обратимой памяти формы, произошло снижение усилия обжатия муфты и вследствие упругости втулки концы трубопроводов свободно вышли из нее.

Процессы сборки макета РТМС при нагреве и разборки при охлаждении без какого-либо внешнего силового воздействия повторили трижды. Во всех трех случаях термомеханические соединения легко собирались и разбирались.

К сожалению, герметичность и несущая способность РТМС оказались невысоки. Статистический анализ показал, что в среднем для РТМС муфтами из сплава ТН1К и втулками из сплава ТН1 максимальное давление герметичности $P = 16$ МПа, максимальное давление разрушения (несущей способности) $Q = 20$ МПа. Для РТМС муфтами из сплава ТН1К и втулками из титанового сплава марки ВТ1-0 или из стали марки ХВГ давление герметичности в среднем составляет 10 МПа, несущей способности – 13 МПа. При увеличении на внутренней поверхности втулок количества уплотняющих поясков с 4 до 6 значения P и Q еще снижаются. Ухудшение характеристик P и Q связано, по-видимому, с тем, что дополнительный элемент (втулка) снижает давление обжатия трубопровода.

Кроме того, РТМС можно получать, изготавливая муфты из сплавов, обладающих эффектом обратимой памяти формы, и подбирая соответствующие режим термообработки и значения предварительной деформации муфт. Исследования фазового состава и термомеханических характеристик сплавов Ti–Ni–Fe марки ТН1К и Ti–Ni–Nb подтвердили наличие ЭПФ и ЭОПФ у данных сплавов.

Для сборки ТМС проводили дорнование муфт в среде жидкого азота. На рис. 2 приведены диаграммы изменения усилий при дорновании муфт. Показано, что для дорнования муфт, изготовленных из сплава Ti-Ni-Nb, требуется максимальное усилие в 1,8 раза большее, чем для дорнования муфт из сплава Ti-Ni-Fe.

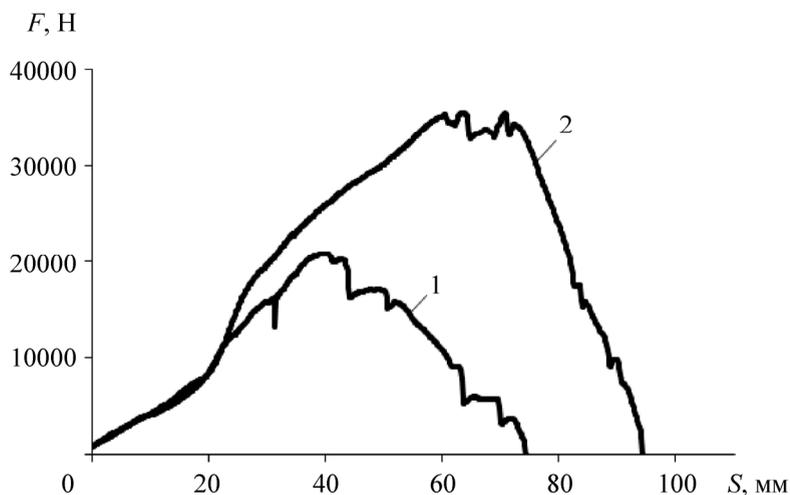


Рис. 2. Диаграммы изменения усилий при дорновании муфт, изготовленных из сплавов Ti-Ni-Fe (1) и Ti-Ni-Nb (2), в зависимости от перемещения дорна

После деформации муфт из сплава Ti-Ni-Fe с внутренним диаметром уплотняющих поясков 11,4 мм и из сплава Ti-Ni-Nb с внутренним диаметром 11,1 мм их надевали на стержень из стали 12X18H10T с наружным диаметром 12 мм. При нагреве до температуры 100 °С получили прочное соединение муфт со стержнем. При охлаждении до температуры -196 °С муфты легко снимались со стержня. Эксперименты продемонстрировали, что муфты из сплавов никелида титана, легированного железом или ниобием, позволяют осуществить разборку соединения за счет использования свойства самого материала – эффекта обратимой памяти формы.

Для доказательства разборности ТМС трубопроводов диаметром от 6 до 36 мм за счет использования свойства ЭОПФ материала муфты и последующего определения эксплуатационных характеристик РТМС из сплава Ti-Ni-Fe марки ТН1К были изготовлены детали макетов РТМС трубопроводов в соответствии с эскизом (рис. 3).

Макеты РТМС муфтами из сплава Ti-Ni-Fe марки ТН1К собирали при температуре жидкого азота, отогревая их затем до комнатной температуры. Разборку макетов ТМС трубопроводов осуществляли путем их охлаждения от комнатной температуры до температуры жидкого азота (-196 °С). При полном охлаждении штуцеры и заглушки легко выходили из муфт. Затем проводили повторную сборку в жидком азоте, после чего отогревали РТМС до комнатной температуры. В итоге вновь получали прочные соединения.

При испытаниях были получены среднее максимальное давление герметичности для разборного ТМС муфтами из сплава Ti-Ni-Fe марки ТН1К $P = 35$ МПа (диаметр трубопровода 6 мм) и $P = 80$ МПа (диаметр трубопровода 36 мм), максимальное давление разрушения (несущей способности) $Q = 145$ МПа (диаметр трубопровода 6 мм) и $Q = 80$ МПа (диаметр трубопровода 36 мм).

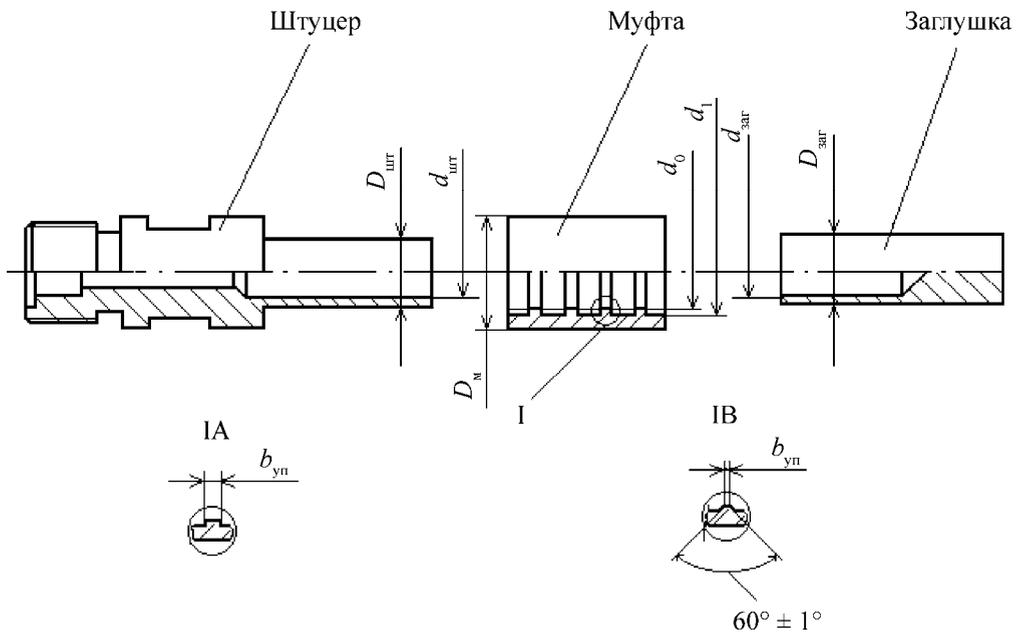


Рис. 3. Эскиз разборного ТМС трубопроводов: 1 – штуцер, 2 – муфта, 3 – заглушка; $D_{шт}$ – наружный диаметр штуцера, $d_{шт}$ – внутренний диаметр штуцера, $D_{заг}$ – наружный диаметр заглушки, $d_{заг}$ – внутренний диаметр заглушки, D_m – исходный наружный диаметр муфты, d_1 – исходный внутренний диаметр муфты, d_0 – исходный внутренний диаметр уплотняющего пояса, $b_{уп}$ – ширина уплотняющего пояса

С муфтами, изготовленными из литого сплава Ti–Ni–Nb для трубопроводов диаметром 14 мм, удалось получить герметичные ТМС, которые легко разбирались при температуре жидкого азота. При испытаниях средние значения $P = 30$ МПа, $Q = 130$ МПа.

Следующую партию макетов РТМС трубопроводов диаметром 12 мм после дорнования муфт из литого сплава Ti–Ni–Nb усовершенствованным способом на 10,5 % общей деформации собрали, нагрев их до 150 °С для полной реализации свойств ЭПФ муфт. Разборку макетов ТМС за счет проявления свойств ЭОПФ материала муфты проводили путем их охлаждения от комнатной температуры до температуры жидкого азота. При полном охлаждении РТМС заглушки и штуцеры легко выходили из муфт. В охлажденном состоянии проводили повторную сборку макетов, нагревая их до 150 °С, и вновь получали прочное соединение. Операцию сборки-разборки термомеханического соединения проводили дважды или трижды. После каждой сборки макеты РТМС трубопроводов подвергали испытанию на герметичность избыточным давлением 15 МПа, и все макеты РТМС после каждой сборки были герметичны. Для данной партии РТМС трубопроводов диаметром 12 мм муфтами, изготовленными из литого сплава Ti–Ni–Nb, в результате испытаний при 20 °С на герметичность и несущую способность получены значения $P = 60$ МПа, $Q = 95$ МПа.

При измеренном реактивном напряжении 400–500 МПа для этого сплава можно ожидать герметичности и несущей способности термомеханических соединений трубопроводов 100–200 МПа, например, при улучшении прочностных и пластических свойств самого сплава, усовершенствовании процесса дорнования муфт, а также выявления закономерностей между геометрическими параметрами уплотняющих поясков муфт до и после дорнования, условиями и режимами дорнования и значениями герметичности и несущей способности макетов РТМС.

Обычно муфты деформируют со скоростью 1 мм/мин. Авторами данной работы установлено, что увеличение скорости дорнования с 1 до 5 мм/мин практически не влияет на герметичность и несущую способность ТМС трубопроводов.

Исследовано влияние скорости дорнования ($V = 5, 20$ и 90 мм/мин) муфт из литого сплава Ti–Ni–Nb для макетов РТМС трубопроводов на следующие геометрические параметры муфт, измеряемые до и после дорнования: максимальное отклонение от идеальной окружности (параметр неровности «пик – впадина») $R_{\max}^{\text{рад}}$ внутренней поверхности муфты, определяемое по результатам измерения радиальных профилей поверхности уплотняющих поясков; боковую длину H уплотняющих поясков муфт; максимальное отклонение от прямолинейности $R_{\max}^{\text{лин}}$, получаемое при измерении наружной поверхности муфт.

Статистическая обработка результатов экспериментов с применением методов Фишера и Стьюдента и предположения о линейной корреляционной зависимости между исследуемыми величинами [9] не выявила значимого влияния скорости дорнования от 5 до 90 мм/мин на геометрические параметры измеряемых муфт РТМС из литого сплава Ti–Ni–Nb [10].

Исследовать влияние скорости дорнования на геометрические параметры муфт РТМС, изготовленных из криогенного сплава Ti–Ni–Fe марки ТН1К, не представляется возможным, поскольку данные муфты необходимо хранить после дорнования и затем работать с ними только при температуре жидкого азота, а измерение их параметров осуществлять только при комнатной температуре. Однако возможно проверять качество изготовления муфт из сплава марки ТН1К, контролируя их геометрические параметры до процесса дорнования.

С целью сокращения времени дорнования муфт, изготовленных из сплавов на основе никелида титана, легированного железом или ниобием, и получения макетов РТМС трубопроводов с высокими эксплуатационными характеристиками исследовано влияние скорости дорнования муфт ($V = 5, 20$ и 90 мм/мин) на герметичность и несущую способность макетов РТМС трубопроводов диаметром 12 мм (табл. 5) [11].

Таблица 5

Результаты статистической обработки значений герметичности и несущей способности, полученных при испытаниях макетов РТМС трубопроводов муфтами, изготовленными из сплавов Ti–Ni–Fe и Ti–Ni–Nb

Характеристика, МПа	Параметры статистической обработки	Выборка 1	Выборка 2	Выборка 3
		$V = 5$ мм/мин	$V = 20$ мм/мин	$V = 90$ мм/мин
Муфты из сплава Ti–Ni–Fe после отжига				
Герметичность	Среднее, МПа	145	140	80
	СКО, МПа	33,3	29,9	10,0
	$K_{\text{вар}}$, %	23	22	13
	Объем выборки n	3	4	3*
	Уравнение линии регрессии	$P = -0,77V + 150; r = 0,77 (n = 10)$ статистически значимо		
Несущая способность	Среднее, МПа	150	145	130
	СКО, МПа	33,3	29,9	41,5
	$K_{\text{вар}}$, %	23	21	32
	Объем выборки n	3	4	4
	Уравнение линии регрессии	$Q = -0,22V + 148; r = 0,26 (n = 11)$ статистически незначимо		

Характеристика, МПа	Параметры статистической обработки	Выборка 1	Выборка 2	Выборка 3
		$V = 5$ мм/мин	$V = 20$ мм/мин	$V = 90$ мм/мин
Муфты из литого сплава Ti–Ni–Nb после закалки				
Герметичность	Среднее, МПа	10	30	50
	СКО, МПа	0,1	17,3	26,5
	$K_{\text{вар}}$, %	1	58	53
	Объем выборки n	3	3	3
	Уравнение линии регрессии	$P = 0,41V + 14; r = 0,69 (n = 9)$ статистически значимо		
Несущая способность	Среднее, МПа	110	125	180
	СКО, МПа	5,0	23,1	26,5
	$K_{\text{вар}}$, %	5	19	15
	Объем выборки n	3	3	3
	Уравнение линии регрессии	$Q = 0,82V + 106; r = 0,88 (n = 9)$ статистически значимо		

Примечание: * – значение $P = 170$ МПа (Ti–Ni–Fe, $V = 90$ мм/мин) было отбраковано по критерию Смирнова для отбраковки резко выделяющихся результатов испытаний [9].

При испытаниях на герметичность макетов РТМС трубопроводов выявлено статистически значимое влияние (линейная корреляционная зависимость) скорости дорнования на максимальное давление герметичности P , причем с ростом скорости дорнования значение P для соединений муфтами из сплава Ti–Ni–Fe уменьшается, а для соединений муфтами из сплава Ti–Ni–Nb – увеличивается.

При испытаниях на несущую способность макетов РТМС трубопроводов выявлено, что для соединений муфтами из сплава Ti–Ni–Fe влияние скорости дорнования на давление разрушения (несущей способности) статистически незначимо, а для соединений муфтами из сплава Ti–Ni–Nb – статистически значимо, причем с увеличением скорости дорнования значение Q линейно возрастает.

Исследовано влияние температуры окружающей среды на герметичность и несущую способность макетов РТМС трубопроводов муфтами из никелида титана, легированного железом или ниобием. Для эксплуатации термомеханических соединений трубопроводов в наружных конструкциях и устройствах в реальных климатических условиях необходимы испытания в диапазоне температур от -50 до 50 °С. Испытания по разъединению путем радиального извлечения деталей макетов РТМС трубопроводов показали (рис. 4), что прочность макета РТМС муфтой из сплава Ti–Ni–Nb при комнатной температуре и при температуре -50 °С больше, чем прочность макета РТМС муфтой из сплава Ti–Ni–Fe марки ТН1К, в 1,3 раза. При достижении температуры порядка -100 °С разъединение деталей макетов РТМС трубопроводов муфтами из того и другого сплава происходило практически без усилий.

Исследования показали, что из термомеханических характеристик сплавов Ti–Ni–Fe и Ti–Ni–Nb наибольший практический интерес для определения диапазона температур эксплуатации РТМС представляют температура развития реактивных напряжений сплавов при нагреве, а также температура формоизменения при охлаждении под нагрузкой (во время фазовых превращений). Зная их, можно прогнозировать прочность макета РТМС трубопроводов в условиях изменения температуры.

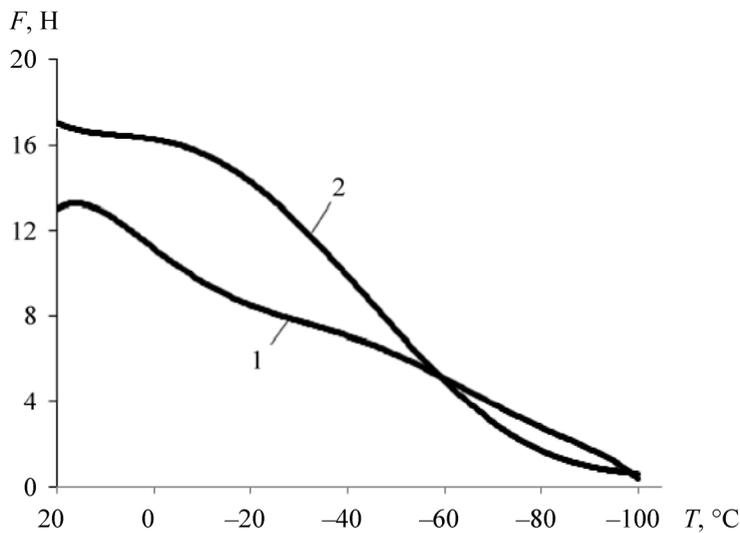


Рис. 4. Графики зависимости усилий разъединения деталей макетов РТМС трубопроводов муфтами, изготовленными из сплава Ti–Ni–Fe марки ТН1К (1) и литого сплава Ti–Ni–Nb (2), от температуры

Выводы

Разработана опытная технология разборного термомеханического соединения трубопроводов муфтами, изготовленными из сплавов Ti–Ni–Fe и Ti–Ni–Nb с эффектом памяти формы. Для технологии РТМС трубопроводов диаметром от 6 до 36 мм муфтами из сплава Ti–Ni–Fe марки ТН1К разработано три варианта конструкции: с использованием жидкостного контртела, металлического контртела и эффекта обратимой памяти формы материала муфты. Технологию РТМС муфтами из литого сплава Ti–Ni–Nb разрабатывали на основе наиболее оптимального варианта – с использованием ЭОПФ материала муфты.

Температура и схема фазовых превращений исследованных сплавов отличаются, поэтому муфты, изготовленные из сплава Ti–Ni–Fe, следует дорновать при температуре $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ и хранить после дорнования при этой же температуре в жидком азоте (т. е. дорнование и хранение муфт требует специальных условий), а муфты из сплава Ti–Ni–Nb необходимо дорновать при температуре $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ и хранить после дорнования при комнатной температуре, что существенно улучшает технологию ТМС.

В разработке опытной технологии РТМС трубопроводов предпочтительнее использование муфт из сплава Ti–Ni–Nb (для трубопроводов диаметром 12 мм $P = 60\text{ МПа}$, $Q = 95\text{ МПа}$), чем из сплава Ti–Ni–Fe. Использование сплавов системы Ti–Ni–Nb с более широким гистерезисом температур фазовых превращений позволит повысить температуру хранения муфт после дорнования и увеличить температурный диапазон эксплуатации РТМС трубопроводов и элементов конструкций.

Список литературы

1. Попов Н. Н. Разработка прогрессивных технологий на основе материалов, обладающих эффектом памяти формы. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2008.
2. Лихачев В. А., Шиманский С. Р. Влияние состава композиции TiNiNb на ее свойства и работоспособность. – Л., 1984. Деп. в ВИНТИ 10.12.84, № 7865-84.
3. Удовенко В. А., Потапов П. Л., Прокошкин С. Д. и др. Исследование функциональных свойств сплава Ti–45 % Ni–10 % Nb с широким гистерезисом мартенситного превращения // Металловедение и термическая обработка металлов. 2000. № 9. С. 19–22.
4. Абрамов В. Я., Александрова Н. М., Боровков Д. В. и др. Структура и функциональные свойства термически и термомеханически обработанных сплавов на основе Ti–Ni–Nb с широким мартенситным гистерезисом. I. Тройные сплавы Ti–Ni–Nb // Физика металлов и металловедение. 2006. № 4(101). С. 436–446.
5. Попов Н. Н., Прокошкин С. Д., Сидоркин М. Ю. и др. Исследование влияния термомеханической обработки на структуру и функциональные свойства сплава 45Ti–45Ni–10Nb // Металлы. 2007. № 1. С. 71–77.
6. Попов Н. Н., Сысоева Т. И., Прокошкин С. Д. и др. Исследование механических свойств и реактивных напряжений сплавов с памятью формы системы Ti–Ni–Nb // Металлы. 2007. № 4. С. 62–70.
7. Попов Н. Н., Аушев А. А., Сысоева Т. И. и др. Исследования структуры, элементного, фазового составов и кинетики фазовых превращений в сплавах с памятью формы системы Ti–Ni–Nb // Металлы. 2012. № 4. С. 97–105.
8. Попов Н. Н., Ларькин В. Ф., Пресняков Д. В. и др. Исследование термомеханических характеристик сплавов системы Ti–Ni–Nb с памятью формы и влияния термической обработки на них // Физика металлов и металловедение. 2013. № 4(114). С. 380–390.
9. Степнов М. Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний. – М.: Машиностроение, 1985.
10. Попов Н. Н., Ларькин В. Ф., Пресняков Д. В., Костылева А. А. Влияние процесса и скорости дорнования на геометрические параметры муфт, изготовленных из сплавов с памятью формы и применяемых в термомеханических соединениях трубопроводов // Заводская лаборатория. Сер. Диагностика материалов. 2013. № 8(79). С. 40–45.
11. Попов Н. Н., Ларькин В. Ф., Пресняков Д. В. и др. Исследование влияния скорости дорнования муфт, изготовленных из сплавов с памятью формы системы Ti–Ni–Nb, на герметичность и несущую способность термомеханического соединения трубопроводов // Там же. 2013. № 5(79). С. 39–45.

Demountable Thermomechanical Joints for Pipelines Represented by Coupling Elements Made of Shape Memory Alloys Belonging to Ti–Ni–Fe and Ti–Ni–Nb Systems

N. N. Popov, V. F. Lar'kin, D. V. Presnyakov, A. A. Aushev, T. I. Sysoeva,
A. A. Kostyleva, Ye. B. Suvorova

Being described is trial technology to join pipelines with demountable thermomechanical coupling elements made of shape memory alloys based on titanium nickelide, alloyed with iron or niobium, developed by the authors. The properties of Ti–Ni–Fe and Ti–Ni–Nb alloys are examined: their elementary and phase composition determined, their microstructure studied, temperatures of phase transitions identified along with mechanical and thermomechanical characteristics. The present technology of demountable thermomechanical coupling of tubes having from 6 to 36 mm diameter by couplings made of Ti–Ni–Fe and Ti–Ni–Nb alloys implies that the best coupling material is that featuring the reversible shape memory effect. The coupling elements made of both alloys are compared and the advantages of Ti–Ni–Nb coupling as against Ti–Ni–Fe one are demonstrated.