

УДК 621.643.415.001.5:669.24/295

Влияние скорости дорнования муфт, изготовленных из сплавов с памятью формы системы Ti–Ni–Nb, на герметичность и несущую способность термомеханического соединения трубопроводов

**Н. Н. Попов, В. Ф. Ларькин,
Д. В. Пресняков, А. А. Костылева,
А. А. Аушев, Т. И. Сысоева**

Представлены результаты исследований свойств сплавов с памятью формы системы Ti–Ni–Nb в литом и прессованном состояниях. С использованием созданной экспериментально-методической базы исследований элементный и фазовый состав сплавов; температуры мартенситно-аустенитных превращений, определенные методом рентгенофазового анализа, и характеристические температуры формовосстановления (формоизменения), установленные деформационным методом; определены их механические характеристики. Исследовано влияние скорости дорнования (5, 20 и 90 мм/мин) на герметичность и несущую способность макетов термомеханического соединения трубопроводов Ø12 мм муфтами, изготовленными из сплавов Ti–Ni–Nb с целью исследования возможности увеличения производительности труда в технологии термомеханического соединения. Установлено, что увеличение скорости дорнования от 5 до 90 мм/мин дорном улучшенной конструкции не оказывает статистически значимого влияния на герметичность и несущую способность макетов термомеханических соединений трубопроводов данными муфтами. Выявлено, что при увеличении скорости дорнования от 5 до 90 мм/мин производительность труда при непосредственном дорновании муфт увеличивается в 7 раз. С учетом же времени установки, охлаждения муфт до температуры –60 °С в парах жидкого азота и дорнования муфт производительность увеличивается в 2,5 раза.

Введение

Одним из вариантов применения сплавов с памятью формы (СПФ) является использование их для изготовления муфт в технологии термомеханического соединения (ТМС) трубопроводов и элементов конструкций. Классическая технология ТМС основана на применении СПФ системы Ti–Ni–Fe. Однако муфту, изготовленную из этих сплавов, необходимо дорновать и хранить до ее монтажа при криогенных температурах [1]. С целью повышения конкурентоспособности техноло-

гии ТМС можно использовать СПФ с более широким мартенситным гистерезисом, например сплавы систем Ti–Ni–Nb [2].

Одной из основных и трудоемких операций в технологии ТМС трубопроводов является дорнование (расширение) внутреннего диаметра муфт. Известные специалисты в области термомеханических соединений трубопроводов Д. Б. Чернов и С. В. Шишкин отмечают [3, 4], что скорость деформирования муфты должна быть ограничена, так как если она слишком высока, выделяющегося тепла может оказаться достаточно, чтобы началось восстановление формы муфты. На основании этих рекомендаций при проведении исследований, описанных в работе [1], скорость дорнования муфт из сплава Ti–Ni–Fe марки ТН1К составляла 1 мм/мин. При дорновании муфт длиной 40 мм с такой скоростью затрачивалось время, равное 1,3 ч. В дальнейшем с целью сокращения времени процесс дорнования муфт велся со скоростью 5 мм/мин. Тем самым удалось сократить время дорнования муфт приблизительно в 4 раза, не ухудшая характеристик прочности макетов ТМС трубопроводов – максимального давления герметичности P и максимального давления разрушения (несущей способности) Q (в дальнейшем – герметичности P и несущей способности Q). В работе [4] на основании расчетов установлено, что предельная скорость раздачи муфт из сплава ТН1К не должна превышать 47 мм/мин.

Ранее проведены исследования влияния процесса и скорости дорнования v , равной 5, 20, 90 мм/мин, на геометрические параметры состояния наружной и внутренней поверхностей муфт, изготовленных из сплавов системы Ti–Ni–Nb партий № 1 и № 2. Выявлено, что скорость дорнования не оказывает статистически значимого влияния на геометрические параметры термомеханических муфт.

Цель настоящей работы – исследование влияния скорости дорнования ($v = 5, 20, 90$ мм/мин) муфт из сплавов Ti–Ni–Nb партий № 1 и № 2 на герметичность и несущую способность макетов термомеханического соединения трубопроводов для определения возможности увеличения производительности труда в технологии ТМС.

Исследовали муфты (рис. 1) для термомеханических соединений трубопроводов диаметром 12 мм.

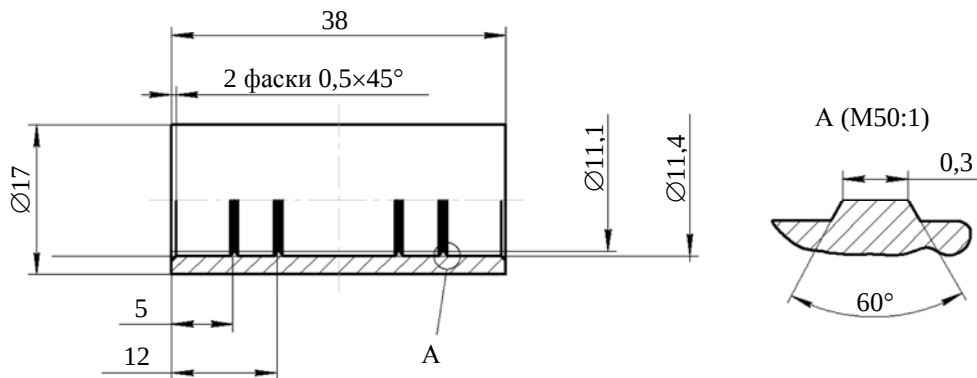


Рис. 1. Эскиз муфты для термомеханического соединения трубопроводов

На основании литературных и патентных данных, а также по результатам предыдущих работ для изготовления муфт, предназначенных для ТМС трубопроводов, были использованы две партии сплава на основе никелида титана, легированного ниобием Ti–Ni–Nb (45Ti–45Ni–10Nb, ат. %):

1) партия № 1 – в виде литого прутка диаметром 125 мм; изготовитель ФГУП Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей» (Санкт-Петербург);

2) партия № 2 – в виде двух литых прутков (№ 1, № 2) диаметром 50 мм каждый и прессованного прутка № 3 диаметром 25 мм; изготовитель ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» (Москва). Химический состав сплавов Ti–Ni–Nb по данным поставщиков приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав сплавов на основе никелида титана, легированных ниобием
(по данным поставщиков)

Сплавы Ti–Ni–Nb	Концентрация	Ti	Ni	Nb	Zr	C
Партия № 1	масс. %	37,7	46,1	16,2	–	–
	ат. %	45,0	45,0	10,0	–	–
Партия № 2	масс. %	37,2	46,5	16,3	<0,1	0,055
	ат. %	44,5	45,4	10,1	<0,06	0,26

Исследование свойств сплавов Ti–Ni–Nb партий № 1, 2, из которых изготавливали муфты для термомеханического соединения трубопроводов

Для определения возможности изготовления муфт для ТМС трубопроводов из данных сплавов с использованием созданной нами экспериментально-методической базы [1] исследованы элементный и фазовый состав сплавов; температуры мартенситно-аустенитных превращений, определенные методом рентгенофазового анализа, и характеристические температуры формовосстановления (формоизменения), определенные деформационным методом; исследованы их механические характеристики. Перед проведением исследований различных свойств образцы сплавов Ti–Ni–Nb партий № 1 и № 2 подвергались термической обработке (ТО):

- исходное состояние без термообработки (режим ТО № 1);
- выдержка при минус 196 °С, закалка при 800 °С в течение 0,5 ч, охлаждение в воде (режим ТО № 2);
- выдержка при 20 °С, отжиг в вакууме при 850 °С в течение 4 ч, охлаждение с печью (режим ТО № 3).

Химический анализ сплавов Ti–Ni–Nb партий № 1, № 2 проводили на электронно-зондовом рентгеновском микроанализаторе. При этом в основном не выявлено (с учетом ошибок) различия элементного состава при сравнении с данными поставщика и с заказанным составом сплава 45Ti–45Ni–10Nb, ат. %. Идентификация фаз методом микрорентгеноспектрального анализа в исследуемых сплавах показала, что основной фазой является никелид титана (TiNi), легированный ниобием, также фиксируются фаза Ti₂Ni, легированная ниобием, и фаза ниобий с элементами внедрения Ti, Ni. Кроме того, в сплаве партии № 1 и в литых прутках сплава партии № 2 присутствуют включения карбида титана и ниобия (Ti, Nb)C, которые в прессованном прутке партии № 2 не зафиксированы.

Рентгеноструктурный анализ проводился на дифрактометре, обладающем прецизионной точностью, высокой мощностью рентгеновского излучения (18 кВт), полной автоматизацией процессов съемки. При комнатной температуре в сплавах методом рентгенофазового анализа зарегистри-

стрированы три фазы: никелид титана $TiNi$ ($B2$ – основная фаза) с оцк-решеткой; значительное количество фазы ниобия с оцк-решеткой; небольшое количество «паразитной» фазы Ti_2Ni с гцк-решеткой. При исследовании кинетики фазовых превращений установлено, что в данных сплавах мартенситное превращение происходит по одностадийной схеме $B2 \leftrightarrow B19'$. Зарегистрированные температуры фазовых превращений приведены в табл. 2.

Таблица 2

Средние температуры фазовых превращений сплавов $Ti-Ni-Nb$ партий № 1, № 2 после различных видов и режимов термической обработки

Сплавы системы $Ti-Ni-Nb$	Номер ТО	Температуры фазовых переходов, °C			
		M_s	M_f	A_s	A_f
Партия № 1	1	–45	–125	–50	10
	2	–45	–95	–35	20
Партия № 2 (литой пруток № 1)	1	*	*	*	*
	3	–55	–110	–50	5
Партия № 2 (литой пруток № 2)	1	*	*	*	*
	3	–50	–105	–50	0
Партия № 2 (прессованный пруток № 3)	1	–70	–130	–60	0
	3	–35	–75	–15	15

Примечание. M_s и M_f – характеристические температуры начала и окончания прямого мартенситного превращения; A_s и A_f – характеристические температуры начала и окончания обратного мартенситного превращения; * – в данных образцах указанные температуры фазовых превращений методом рентгенофазового анализа зарегистрировать не удалось.

Исследования механических свойств проводили на испытательной машине UTS-100K (Германия), термомеханических – на устройствах собственных оригинальных разработок [1]. Результаты исследований механических и термомеханических свойств сплавов приведены в табл. 3, 4.

Выявлено, что наибольшими прочностными и пластическими свойствами обладает прессованный пруток № 3 сплава $Ti-Ni-Nb$ партии № 2 как в исходном состоянии (ТО № 1), так и после вакуумного отжига (ТО № 3): предел прочности $\sigma_b = 865-880$ МПа; фазовый предел текучести $\sigma_{\phi} = 255-260$ МПа; предел текучести материала с памятью формы $\sigma_t^{МПФ} = 810-830$ МПа; максимальная деформация образца перед разрывом (под нагрузкой) $\varepsilon_0^{\max} = 26,7-43,0$ %; относительное остаточное удлинение $\delta = 18-31$ %.

Установлено, что средние значения температур $A_s^{\text{ЭПФ}}$, определенных деформационным методом и вызывающих наибольший интерес в технологии ТМС трубопроводов, более всего отличаются от комнатной температуры $T_{\text{комн}} = 20-25$ °C для прессованного состояния (пруток № 3) сплава системы $Ti-Ni-Nb$ партии № 2 как в исходном состоянии (ТО № 1), так и после вакуумного отжига (ТО № 3).

По результатам исследований различных свойств сплавов $Ti-Ni-Nb$ партий № 1, № 2 подтверждена пригодность указанных сплавов для использования их в качестве материалов для изготовления муфт ТМС трубопроводов.

Таблица 3

Средние значения основных механических характеристик сплава Ti–Ni–Nb партий № 1 и № 2 после различных видов и режимов термообработки

Сплав Ti–Ni–Nb	σ_{ϕ} , МПа	σ_T , МПа	σ_B , МПа	$\varepsilon_0^{\max}$, %	δ , %
Исходное состояние (ТО № 1)					
Партия № 1 (литой)	220	640	690	–	7,0
Партия № 2 (литой пруток № 1)	195	675	730	15,7	10,9
Партия № 2 (литой пруток № 2)	190	640	680	15,8	10,3
Партия № 2 (прессованный пруток № 3)	260	830	865	26,7	18,0
Закалка (режим ТО № 2)					
Партия № 1 (литой)	210	640	690	–	9,8
Вакуумный отжиг (ТО № 3)					
Партия № 2 (литой пруток № 1)	145	645	680	13,6	8,6
Партия № 2 (литой пруток № 2)	100	650	695	14,3	8,5
Партия № 2 (прессованный пруток № 3)	255	810	880	43,0	31,0

Примечание: σ_{ϕ} – фазовый предел текучести; σ_T – предел текучести материала с памятью формы; σ_B – предел прочности; $\varepsilon_0^{\max}$ – максимальная деформация образца перед разрывом (под нагрузкой); δ – относительное остаточное удлинение.

Таблица 4

Средние значения характеристических температур сплавов Ti–Ni–Nb, партий № 1 и № 2 после различных видов и режимов термообработки

Пруток, № партии	$A_s^{\text{ЭПФ}}$, °C	$A_f^{\text{ЭПФ}}$, °C	$M_s^{\text{ЭОПФ}}$, °C	$M_f^{\text{ЭОПФ}}$, °C
Исходное состояние (ТО № 1)				
Партия № 1	36	57	–	–
Партия № 2 (литой пруток № 1)	28	52	–	–
Партия № 2 (литой пруток № 2)	22	52	–	–
Партия № 2 (прессованный пруток № 3)	67	81	–25	–63
Закалка (ТО № 2)				
Партия № 1	43	73	–	–

Окончание табл. 4

Пруток, № партии	$A_s^{\text{ЭПФ}}, ^\circ\text{C}$	$A_f^{\text{ЭПФ}}, ^\circ\text{C}$	$M_s^{\text{ЭОПФ}}, ^\circ\text{C}$	$M_f^{\text{ЭОПФ}}, ^\circ\text{C}$
Вакуумный отжиг (ТО № 25)				
Партия № 2 (литой пруток № 1)	38	62	–39	–98
Партия № 2 (литой пруток № 2)	27	52	–62	–114
Партия № 2 (прессованный пруток № 3)	76	86	–33	–51

Примечание: $A_s^{\text{ЭПФ}}$ и $A_f^{\text{ЭПФ}}$ – характеристические температуры начала и окончания формовосстановления в свободном состоянии при проявлении эффекта памяти формы (ЭПФ); $M_s^{\text{ЭОПФ}}$ и $M_f^{\text{ЭОПФ}}$ – характеристические температуры начала и окончания формоизменения в свободном состоянии при проявлении эффекта обратимой памяти формы (ЭОПФ).

Процедура дорнования муфт и проведение экспериментов по определению герметичности и несущей способности макетов термомеханического соединения трубопроводов

После изготовления все муфты подвергали термической обработке – закалке (режим ТО № 2) (муфты партий сплава № 1 и № 2) и вакуумному отжигу (режим ТО № 3) (муфты партии сплава № 2) для снятия внутренних напряжений, возникающих во время их изготовления, и улучшения механических и термомеханических свойств.

Дорнование муфт со скоростями v , равными 5, 20, 90 мм/мин, проводилось на испытательной машине UTS-100K (Германия) при температуре -60°C в парах жидкого азота с помощью оригинального приспособления собственной разработки Л429 [1]. В данном приспособлении реализуется такой способ дорнования, как проталкивание дорна через тело муфты без обратного хода. Для дорнования муфт, изготовленных из сплава Ti–Ni–Nb партии № 1, использовали дорн без калибрующего участка. Муфты партии № 2 «раздавали» одноступенчатым дорном улучшенной конструкции (с наличием калибрующего участка), что позволяло равномерно распределить нагрузку на все четыре пояса муфты при окончании процесса дорнования. Максимальный нагрев муфт в процессе дорнования составлял $\sim 35^\circ\text{C}$ при $v = 90$ мм/мин.

Макеты ТМС трубопроводов собирали в соответствии с эскизом, приведенным на рис. 2.

После сборки макетов ТМС трубопроводов их испытывали на герметичность и несущую способность в соответствии со схемой, приведенной на рис. 3.

Испытания на герметичность и несущую способность производили азотной газообразной смесью по ГОСТ 9293-74, которая находилась в баллоне 1. Для регулирования давления в системе смесь подавали в накопитель 2, после чего для увеличения давления до нужного для испытаний значения – в трехступенчатый компрессор 3, а затем в испытываемую сборку 6 макета ТМС трубопроводов. Контроль за давлением смеси в системе осуществляли манометрами М1 и М2. Давление в систему подавали вентилем В1. Для стравливания давления из системы использовали вентиль В2. Значения герметичности и несущей способности регистрировали по показаниям манометра М3. Давление в макете ТМС трубопроводов повышали ступенчато по 5 МПа с выдержкой на каждой ступени не менее 10 мин. Сборку считали герметичной, если в течение 10 мин не наблю-

далось падения давления. При испытании на несущую способность происходило разрушение макета со стороны одного из элементов трубопроводов.

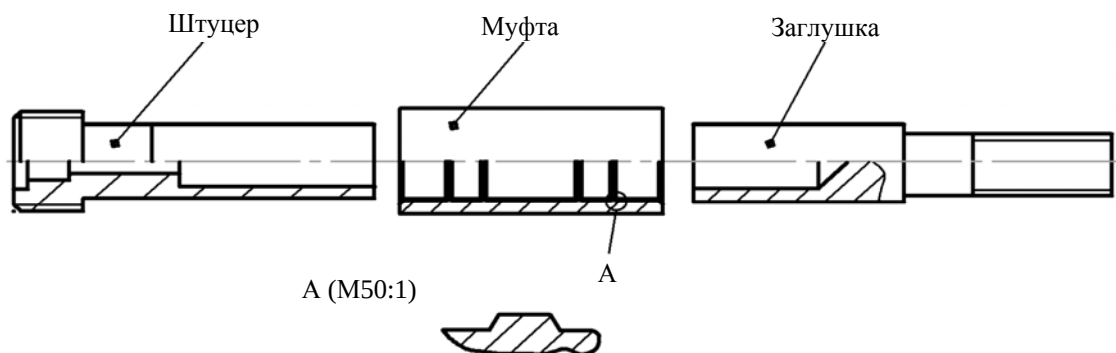


Рис. 2. Эскиз макета ТМС трубопроводов с помощью муфт, изготовленных из сплавов с памятью формы

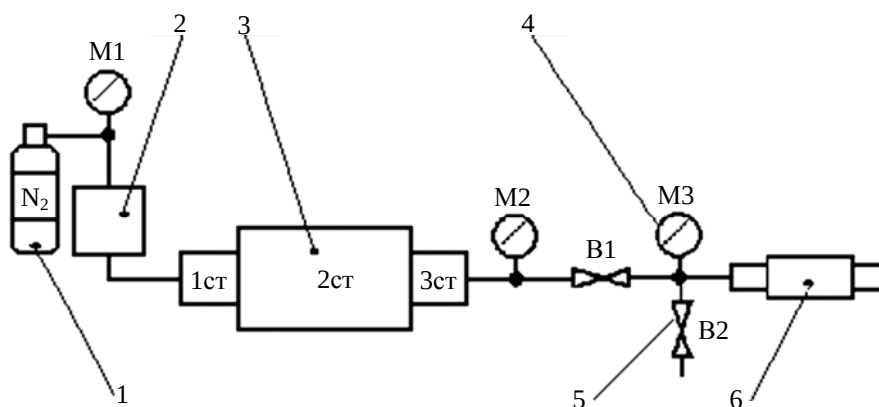


Рис. 3. Схема испытаний макетов ТМС трубопроводов в лаборатории высоких давлений: 1 – газовый баллон; 2 – газовый накопитель; 3 – трехступенчатый газовый компрессор (1ст, 2ст, 3ст – ступени компрессора); M1 – манометр контроля давления из баллона; M2 – манометр контроля давления в газовой системе; M3(4) – манометр контроля давления в испытуемом макете ТМС трубопроводов; B1 – вентиль подачи газовой смеси в систему; B2 (5) – вентиль стравливания давления из системы; 6 – испытуемый макет ТМС трубопроводов

Исследование влияния скорости дорнования муфт из сплавов Ti–Ni–Nb на герметичность и несущую способность макетов термомеханических соединений трубопроводов

Полученные результаты испытаний на герметичность и несущую способность макетов ТМС трубопроводов подвергались статистической обработке (см. табл. 5–7).

Таблица 5

Результаты статистической обработки значений герметичности и несущей способности, полученных при испытаниях макетов ТМС трубопроводов муфтами (после ТО № 2), изготовленными из литого прутка сплава Ti–Ni–Nb (партия № 1)

Параметры статистической обработки	Выборка		
	№ 1, $v = 5$ мм/мин	№ 2, $v = 20$ мм/мин	№ 3, $v = 90$ мм/мин
Герметичность P , МПа			
Среднее, МПа	10	30	50
Объем выборки n	3	3	3
СКО, МПа	0,1	17,3	26,5
Коэффициент вариации, %	1	58	53
Несущая способность Q , МПа			
Среднее, МПа	110	123	180
Объем выборки n	3	3	3
СКО, МПа	5,0	23,1	26,5
Коэффициент вариации, %	5	19	15

Таблица 6

Результаты статистической обработки значений герметичности и несущей способности, полученных при испытаниях макетов ТМС трубопроводов муфтами (после ТО № 3), изготовленными из литых прутков № 1 и № 2 сплава Ti–Ni–Nb партии № 2

Параметры статистической обработки	Выборка		
	№ 1, $v = 5$ мм/мин, литой пруток № 2	№ 2, $v = 5$ мм/мин, литой пруток № 1	№ 3, $v = 90$ мм/мин, литой пруток № 1
Герметичность P , МПа			
Среднее, МПа	173	148	145
Объем выборки n	3	2	2
СКО, МПа	40,7	3,5	14,1
Коэффициент вариации, %	24	2	10
Несущая способность Q , МПа			
Среднее, МПа	177	151	150
Объем выборки n	3	2	2
СКО, МПа	38,4	0,7	14,1
Коэффициент вариации, %	22	1	9

Таблица 7

Результаты статистической обработки значений герметичности и несущей способности, полученных при испытаниях макетов ТМС трубопроводов муфтами (после ТО № 3), изготовленными из прессованного прутка № 3 сплава Ti–Ni–Nb партии № 2

Параметры статистической обработки	Выборка		
	№ 1, $v = 5$ мм/мин	№ 2, $v = 20$ мм/мин	№ 3, $v = 90$ мм/мин
Герметичность (P , МПа)			
Среднее, МПа	175	157	153
Объем выборки n	2	3	2
СКО, МПа	28,3	10,4	248
Коэффициент вариации, %	16	7	16
Несущая способность (Q , МПа)			
Среднее, МПа	180	161	157
Объем выборки n	2	3	2
СКО, МПа	28,3	9,6	26,2
Коэффициент вариации, %	16	6	17

Дополнительно проведен линейный корреляционный анализ [5] зависимости средних значений P и Q , полученных при испытаниях на герметичность и несущую способность термомеханических соединений трубопроводов муфтами (после соответствующей ТО), изготовленными из сплава Ti–Ni–Nb партий № 1 (ТО № 2) и № 2 (ТО № 3), от скорости дорнования v муфт (рис. 4–6).

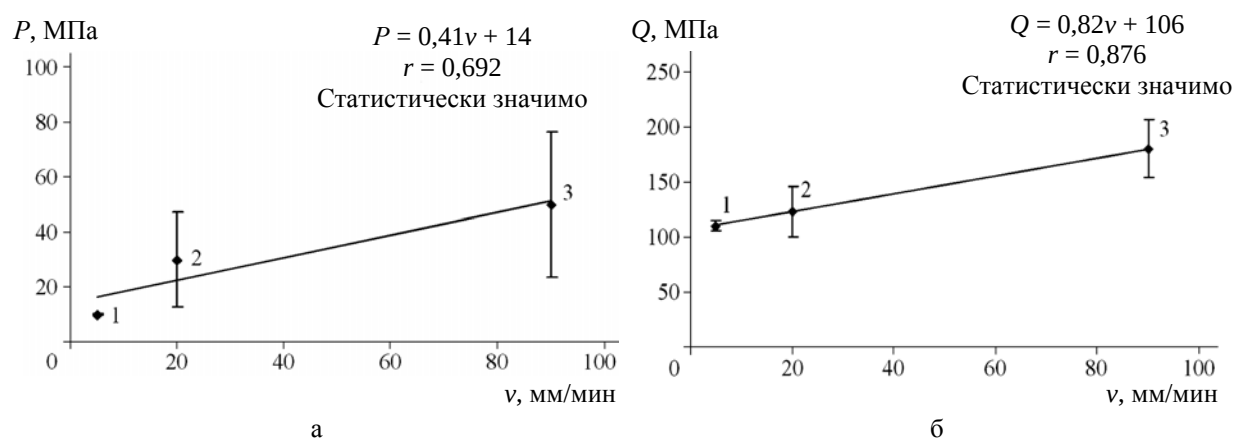


Рис. 4. Зависимость средних значений P (а) и Q (б), полученных при испытаниях на герметичность и несущую способность ТМС трубопроводов муфтами (после ТО № 2), изготовленными из литого прутка сплава Ti–Ni–Nb партии № 1, от скорости дорнования v муфт: 1–3 – номера выборок

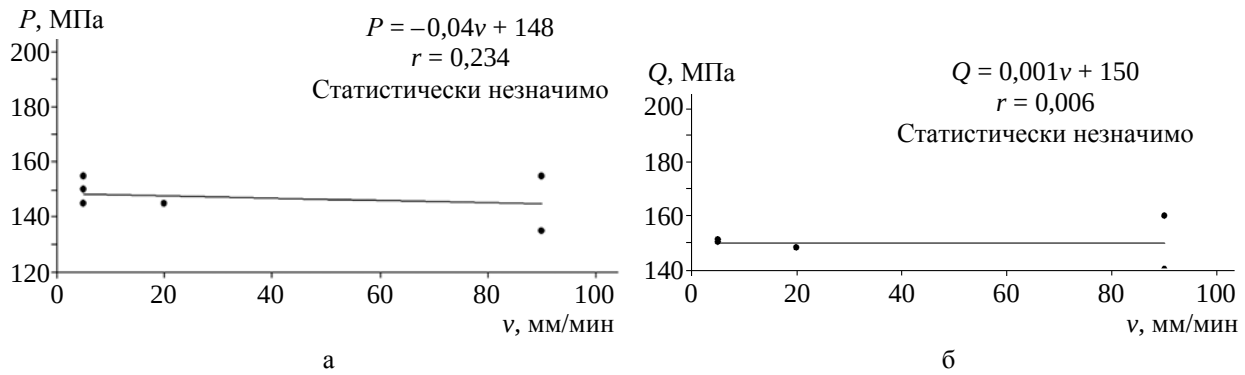


Рис. 5. Зависимость средних значений P (а) и Q (б), полученных при испытаниях на герметичность и несущую способность ТМС трубопроводов муфтами (после ТО № 3), изготовленными из литых прутков № 1 и № 2 сплава Ti–Ni–Nb партии № 2, от скорости дорнования v муфт

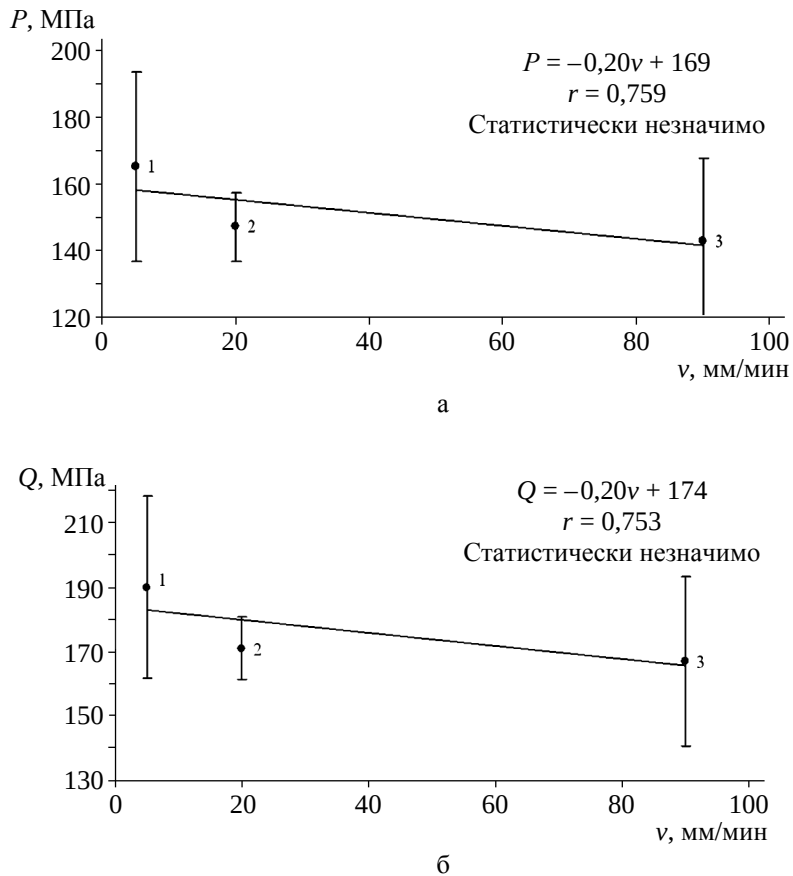


Рис. 6. Зависимость средних значений P (а) и Q (б), полученных при испытаниях на герметичность и несущую способность ТМС трубопроводов муфтами (после ТО № 3), изготовленными из прессованного прутка № 3 сплава Ti–Ni–Nb партии № 2, от скорости дорнования v муфт: 1–3 – номера выборок

Статистический анализ результатов испытаний (с применением методов Фишера и Стьюдента и предположением о линейной корреляционной зависимости между исследуемыми величинами) на герметичность и несущую способность показал, что для ТМС муфтами (после ТО № 2), изготовленными из литого прутка сплава Ti–Ni–Nb (партия № 1), влияние скорости дорнования на давление герметичности и на давление разрушения статистически значимо, причем с увеличением скорости дорнования эти значения возрастают (см. рис. 4).

Причиной очень низких значений герметичности макетов ТМС трубопроводов муфтами из сплава Ti–Ni–Nb партии № 1 (см. табл. 5) были дефекты, которые появились в результате дорнования муфт из данного сплава при использовании дорна без калибрующей части:

- частичное разрушение рабочих поверхностей уплотняющих поясков с отрывом металла или с отслаиванием частей уплотняющих поясков;
- следы материала дорна на рабочей поверхности уплотняющих поясков муфт;
- сеть микротрещин на внутренней поверхности муфт.

Необходимо отметить, что для дорнования муфт, изготовленных из сплавов Ti–Ni–Nb разных партий, использовали дорны различной конструкции, которые по-разному оказывали давление (как продольное, так и поперечное) на пояски в процессе расширения внутреннего диаметра муфт.

Статистически значимое влияние скорости дорнования v муфт, изготовленных из литых прутков № 1 и № 2 и прессованного прутка № 3 сплава Ti–Ni–Nb партии № 2 (после ТО № 3), на значения герметичности P и несущей способности Q не выявлено.

Влияние скорости дорнования муфт, изготовленных из сплавов системы Ti–Ni–Nb, на повышение производительности труда в процессе дорнования муфт термомеханических соединений трубопроводов

Для муфт (ТО № 3), изготовленных из сплава Ti–Ni–Nb партии № 2 в литом и прессованном состояниях, в табл. 8 приведены значения трудоемкости T_p (времени, затраченного на дорнование одной муфты) и производительности труда Π_T (выработки в единицу времени – в 1 ч) при непосредственном дорновании муфты (T_p' и Π_T'), а также при установке, охлаждении муфты до температуры -60°C в парах жидкого азота (~ 10 мин) и дорновании муфты в устройстве Л429 (T_p и Π_T). Прогнозируемую производительность труда определяли по формуле

$$\Pi_T = \frac{T}{T_p},$$

где T – единица времени ($T = 60$ мин), во время которой дорновали муфты; T_p – трудоемкость, т. е. время (мин), затраченное на дорнование одной муфты.

Таблица 8

Средние значения трудоемкости и производительности труда в процессе дорнования муфт в устройстве Л429, изготовленных из сплава Ti–Ni–Nb партии № 2 в литом и прессованном состояниях, при различных скоростях v

v, мм/мин	Количество муфт <i>n</i>	При непосредственном дорновании муфты		При установке, охлаждении и дорновании муфты	
		Тр', мин	П' _т , муфт/ч	Тр = Тр' + 10, мин	П _т , муфт/ч
Литые прутки № 1 и 2					
5	5	23,8	2,5	33,8	1,8
20	1	6,0	10	16,0	3,8
90	2	3,3	18,2	13,3	4,5
Прессованный пруток № 3					
5	2	23,4	2,6	33,4	1,8
20	3	5,9	10,2	15,9	3,8
90	2	3,3	18,2	13,3	4,5
Объединенные значения для сплава Ti–Ni–Nb партии № 2					
5	7	23,6	2,6	33,6	1,8
20	4	6,0	10,1	16,0	3,8
90	4	3,3	18,2	13,3	4,5

Установлено, что при увеличении скорости дорнования от 5 до 90 мм/мин производительность труда P'_T при непосредственном дорновании муфт увеличивается с 2,6 до 18,2 муфт/ч (в 7 раз). С учетом времени установки, охлаждения муфт до температуры -60°C в парах жидкого азота и дорнования муфт в устройстве Л429 производительность труда P_T увеличили с 1,8 до 4,5 муфт/ч (в 2,5 раза); при этом трудоемкость соответственно уменьшили.

Таким образом, в процессе исследования влияния скорости дорнования на герметичность P и несущую способность Q макетов ТМС трубопроводов муфтами из сплавов Ti–Ni–Nb партий № 1 и 2 (в литом и прессованном состояниях) установлено, что для ТМС муфтами, изготовленными из сплава Ti–Ni–Nb партии № 1, влияние скорости дорнования на герметичность и несущую способность статистически значимо, причем с увеличением скорости дорнования эти значения возрастают: P – от 10 до 50 МПа, Q – от 110 до 180 МПа. Для ТМС трубопроводов муфтами, изготовленными из сплава партии № 2, статистически значимое влияние скорости дорнования муфт на значения герметичности и несущей способности не выявлено. Поскольку скорость дорнования не оказывает статистически значимого влияния на геометрические параметры термомеханических муфт, изготовленных из сплавов системы Ti–Ni–Nb партии № 2, на герметичность и несущую способность макетов муфт из этих сплавов, то производительность труда в технологии термомеханического соединения трубопроводов можно существенно повысить по сравнению с рекомендациями работы [4] за счет увеличения скорости дорнования муфт до 90 мм/мин.

Список литературы

1. Попов Н. Н. Разработка прогрессивных технологий на основе материалов, обладающих эффектом памяти формы. – Саратов: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2008.
2. 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.
3. Чернов Д. Б., Паперский А. П., Хасьянов У. и др. Термомеханические соединения элементами «с памятью формы» // Авиационная промышленность. 1984. № 6. С. 6–8.
4. Шишкин С. В., Махутов Н. А. Расчет и проектирование силовых конструкций на сплавах с эффектом памяти формы. – М. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2007.
5. Степнов М. Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний. – М.: Машиностроение, 1985.

The Influence of Mandrelling Rate for the Couplings Made of Ti – Ni – Nb Shape Memory Alloys on Leak Proofness and Bearing Capacity of Thermomechanical Connection of Pipelines

N. N. Popov, V. F. Lar'kin, D. V. Presnyakov, A. A. Kostyleva,
A. A. Aushev, T. I. Sysoyeva

Being presented are the results of study of Ti–Ni–Nb shaped memory alloys in their cast and pressed states. The experimental and methodological basis developed by the authors was used to study elemental and phase compositions of the alloys; to determine the temperature of martensitic-austenitic transformations by X-ray phase analysis, to determine characteristic temperatures of form restoration (form transformation) using deformation method; to define their mechanical characteristics. The influence of mandrelling rate ($v = 5, 20$ and 90 mm/min) on the leak proofness and bearing capability of prototypic thermal-mechanical connection (TMC) of the pipelines (having 12 mm diameter) with couplings made of Ti–Ni–Nb alloys was studied in order to investigate the possibility to increase working efficiency in TMC technology. It was stated that the mandrelling rate, if increased from 5 to 90 mm/min using a mandrel of the improved design, does not exert any statistically meaningful influence on leak proofness and bearing capability of TMC prototypes of pipelines adjoined with the couplings of interest. It was also revealed that with the mandrelling rate increased from 5 to 90 mm/min the labour productivity grows up to 7 times provided that the direct mandrelling is executed. In practice labour productivity increases only up to 2.5 times since the time of installation/cooling of couplings down to $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ in liquid nitrogen vapor and the effort for mandrelling process are to be subtracted.