

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ ДОРНОВАНИЯ МУФТ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ СПЛАВА С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ СИСТЕМЫ Ti-Ni-Nb, НА ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ТРУДА В ТЕХНОЛОГИИ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО СОЕДИНЕНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ

Д. В. Пресняков, Н. Н. Попов, В. Ф. Ларькин, А. А. Костылева, Е. Б. Суворова

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

Материалы с памятью формы (МПФ), которые после наведения им деформации могут неограниченно долго оставаться в деформированном состоянии, а затем при нагреве в определенном интервале температур полностью или частично восстанавливают свою форму и размеры, относятся к так называемым «интеллектуальным» материалам. Они применяются в мировой практике для решения различных задач, в частности, для термомеханического соединения трубопроводов (ТМС).

Одной из основных и трудоемких операций в технологии ТМС трубопроводов является дорнование (расширение внутреннего диаметра) муфт. Известные специалисты в области термомеханических соединений трубопроводов Чернов Д. Б. и Шишкин С. В. отмечают [1, 2], что скорость деформирования муфты должна быть ограничена, так как если она слишком высока, выделяющегося тепла может оказаться достаточно, чтобы началось восстановление формы муфты. Ранее рекомендовали скорость деформирования муфт, равную 1 мм/мин. При дорновании муфты длиной 40 мм с такой скоростью затрачивается время, равное 1,3 ч. В наших работах было показано, что увеличение скорости дорнования от 1 до 5 мм/мин практически не влияет на значения герметичности и несущей способности термомеханического соединения трубопроводов. В дальнейшем с целью сокращения времени дорнования одной муфты процесс ведется со скоростью 5 мм/мин. Тем самым удалось сократить время дорнования одной муфты от 1,3 ч до 20 мин, не ухудшая герметичности и несущей способности макетов ТМС трубопроводов. Для исследования влияния более высокой скорости дорнования на геометрические параметры муфт из сплава Ti-Ni-Nb, а также на герметичность и несущую способность макетов термомеханического соединения трубопроводов данными муфтами с целью увеличения производительности труда в технологии ТМС и была проведена данная работа.

Объекты исследований

На основе литературных и патентных данных и по результатам предыдущих работ для изготовления

муфт, предназначенных для термомеханического соединения трубопроводов, был использован сплав с памятью формы на основе никелида титана, легированного ниобием (45Ti-45Ni-10Nb, ат. %, партия № 72) в прессованном состоянии; изготовитель ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» (ФГУП «ВИАМ», г. Москва). Химический состав сплава Ti-Ni-Nb по данным поставщика приведен в табл. 1.

Для определения возможности изготовления муфт для ТМС трубопроводов из данного сплава были проведены исследования его элементного и фазового составов; определены температуры фазовых превращений, его механические и термомеханические свойства (см. табл. 2). Результаты различных исследований свойств сплава системы Ti-Ni-Nb партии № 72 подробно представлены в докладе на конференции «Молодежь в науке» в 2010 г. Результаты проведенных исследований подтверждена пригодность указанного сплава для использования его в качестве материалов муфт, предназначенных для технологии термомеханического соединения трубопроводов.

Муфты для ТМС трубопроводов диаметром 12 мм изготавливали в соответствии с эскизом, представленным на рис. 1.

После изготовления все муфты подвергали термической обработке – вакуумному отжигу по режиму (20 °С, отжиг в вакууме при температуре 850 °С в течение 4 часов, охлаждение с печью) для улучшения их механических и термомеханических свойств.

Макеты термомеханических соединений трубопроводов муфтами из сплава системы Ti-Ni-Nb партии № 72 собирали в соответствии с эскизом, приведенным на рис. 2.

Оборудование для проведения экспериментов

Для дорнования (расширения внутреннего диаметра) муфт термомеханических соединений трубопроводов на испытательной машине UTS-100K (Германия) использовали приспособление Л429, эскиз которого представлен на рис. 3, а его общий вид – на рис. 4.

Химический состав сплава Ti-Ni-Nb по данным поставщика

Сплав	Концентрация	Ti	Ni	Nb	Zr	C
Партия № 72	масс. %	37,2	46,5	16,3	<0,1	0,055
	ат. %	44,5	45,4	10,1	<0,06	0,26

Результаты исследований температур фазовых превращений, механических и термомеханических свойств прессованного сплава Ti-Ni-Nb партии № 72

Температуры фазовых переходов, °C					
Термообработка	M_s	M_f	A_s	A_f	Гистерезис $ M_s - A_f $
Без термообработки	-70	-130	-60	0	70
Вакуум. отжиг 850 °C, 4 ч	-35	-75	-15	15	50
Основные механические свойства					
Термообработка	σ_ϕ , МПа	$\sigma_\tau^{\text{МПФ}}$, МПа	σ_b , МПа	$\varepsilon_0^{\text{max}}$, %	δ , %
Без термообработки	262	832	864	26,68	17,96
Вакуум. отжиг 850 °C, 4 ч	255	810	880	43,00	31,02
Характеристические температуры формовосстановления (формоизменения), °C					
Термообработка	$A_s^{\text{ЭПФ}}$, °C	$A_f^{\text{ЭПФ}}$, °C	$M_s^{\text{ЭОПФ}}$, °C	$M_f^{\text{ЭОПФ}}$, °C	Гистерезис $ A_s^{\text{ЭПФ}} - M_f^{\text{ЭОПФ}} $
Без термообработки	67	81	-25	-63	130
Вакуум. отжиг 850 °C, 4 ч	76	86	-33	-51	127

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;
 σ_ϕ – фазовый предел текучести;
 $\sigma_\tau^{\text{МПФ}}$ – предел текучести материала с памятью формы;
 σ_b – предел прочности;
 $\varepsilon_0^{\text{max}}$ – максимальная деформация образца перед разрывом (под нагрузкой);
 δ – относительное удлинение;
 $A_s^{\text{ЭПФ}}$ и $A_f^{\text{ЭПФ}}$ – характеристические температуры начала и окончания формовосстановления в свободном состоянии при проявлении ЭПФ;
 $M_s^{\text{ЭОПФ}}$ и $M_f^{\text{ЭОПФ}}$ – характеристические температуры начала и окончания формоизменения в свободном состоянии при проявлении ЭОПФ

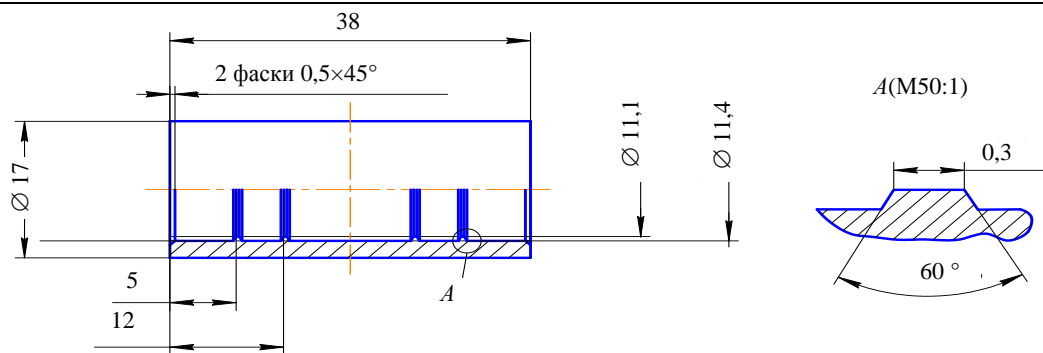


Рис. 1. Эскиз муфты для термомеханического соединения трубопроводов

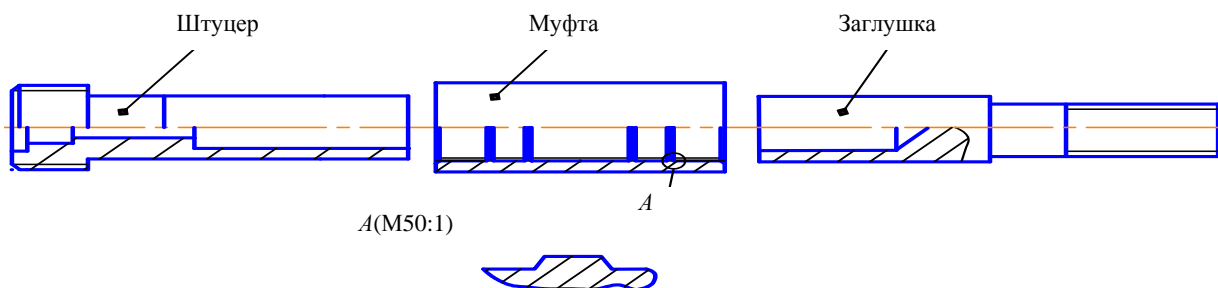


Рис. 2. Эскиз макета термомеханического соединения трубопроводов за счет использования свойства ЭПФ материала муфты

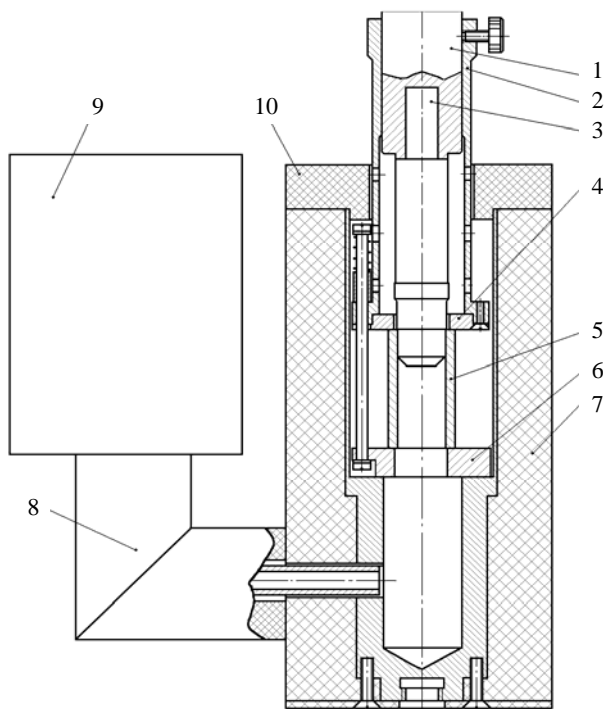


Рис. 3. Эскиз приспособления Л429 для дорнования муфт: 1 – толкатель; 2 – корзина; 3 – дорн; 4 – упорный верхний фланец; 5 – муфта; 6 – упорный нижний фланец; 7 – термоизолированный стакан; 8 – термоизолированный патрубок для подачи жидкого азота в рабочую зону; 9 – термоизолированная емкость для жидкого азота; 10 – термоизолирующая крышка

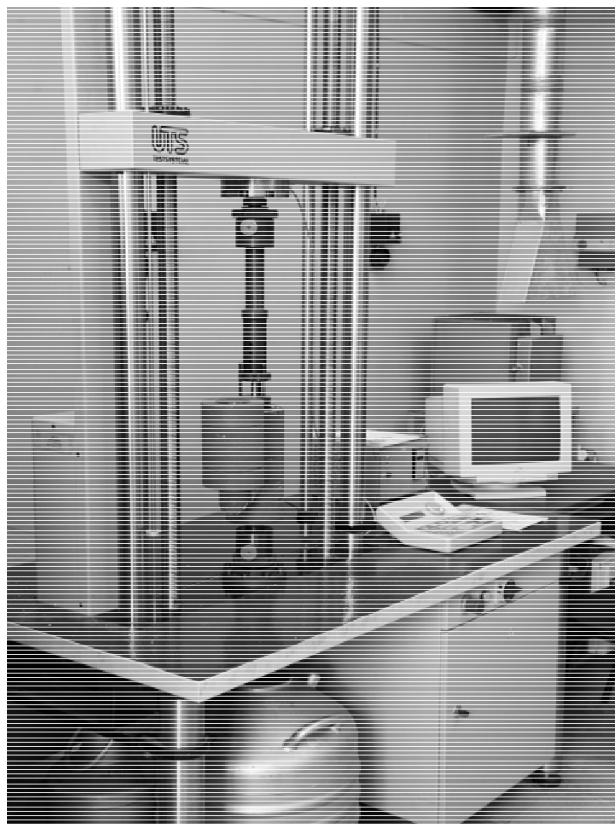


Рис. 4. Общий вид приспособления Л429, смонтированного на испытательной машине UTS-100K

На рис. 5 приведен общий вид одноступенчатого дорна, который используется в приспособлении Л429 для дорнования муфт. Данная конструкция дорна является улучшенной в сравнении с используемыми ранее. Дорн имеет калибрующий участок, что позволяет равномерно распределить нагрузку на все четыре пояска муфты при завершении операции дорнования.

Измерения геометрических параметров муфт термомеханических соединений трубопроводов проводили на установке (общий вид см. рис. 6), предназначенной для измерения отклонений формы плоских поверхностей и тел вращения от прямолинейности, от круглости, соответственно, а также для определения других геометрических характеристик сложных деталей при комнатной температуре.

Испытания на герметичность и несущую способность макетов термомеханических соединений трубопроводов проводили в лаборатории высоких давлений (ЛВД) завода ВНИИЭФ азотной газообразной смесью по ГОСТ 9293-74. Испытания проводили до разгерметизации или до разрушения макета ТМС.

Описание экспериментов и обсуждение результатов

При увеличении скорости дорнования муфт без ухудшения их функциональных свойств, а также без статистически значимого уменьшения значений герметичности и несущей способности макетов ТМС трубопроводов можно повысить производительность труда, измеряемую количеством продукции, произведенной в единицу рабочего времени, например, за час. Чем больше вырабатывается продукции в единицу времени, тем меньше расходуется труда на единицу продукции, тем меньше трудоемкость продукции, исчисляемая в человеко-часах. Следовательно, показателем роста производительности труда является или увеличение выпуска продукции за определенное время, или уменьшение затрат труда, измеряемого рабочим временем, на выпуск определенного количества продукции [3].

Исследование влияния скорости дорнования на геометрические параметры профиля поверхности термомеханических муфт, изготовленных из сплавов Ti-Ni-Nb

С целью получения сведений о влиянии скорости дорнования на геометрические параметры муфт ТМС после дорнования с различными скоростями ($V = 5, 20, 90$ и 100 мм/мин) проведены измерения геометрических параметров профиля внутренней и наружной поверхности муфт № 3–11, изготовленных из прессованного сплава системы Ti-Ni-Nb партии № 72 с последующей статистической обработкой результатов экспериментов. Схема измерений поверхности муфты представлена на рис. 7.

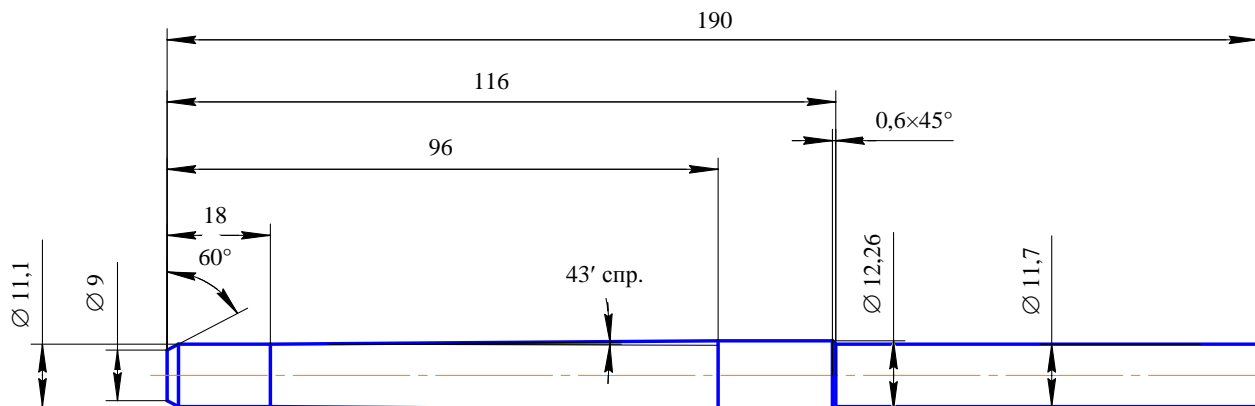


Рис. 5. Общий вид одноступенчатого дорна

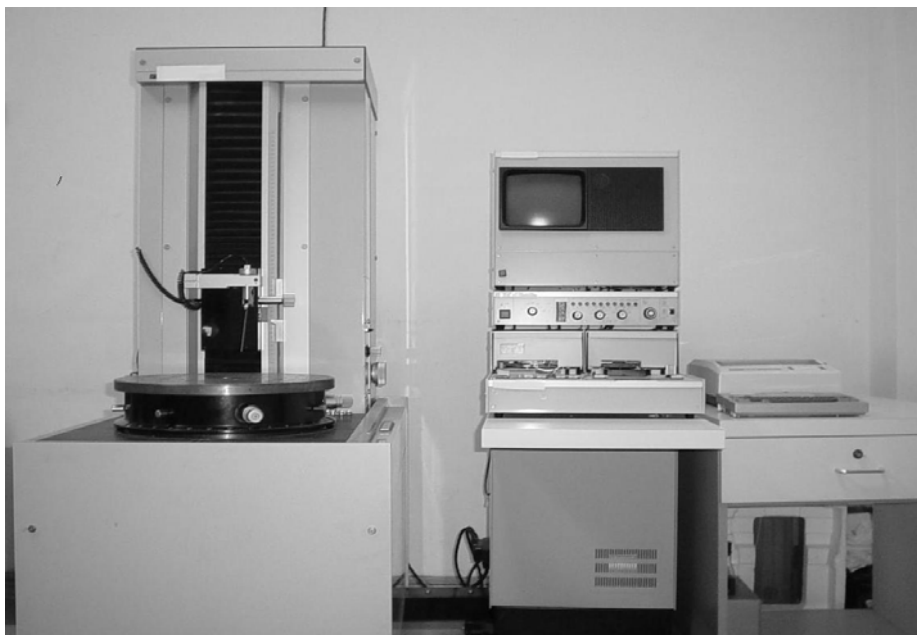


Рис. 6. Общий вид установки для измерений геометрических параметров профиля поверхности

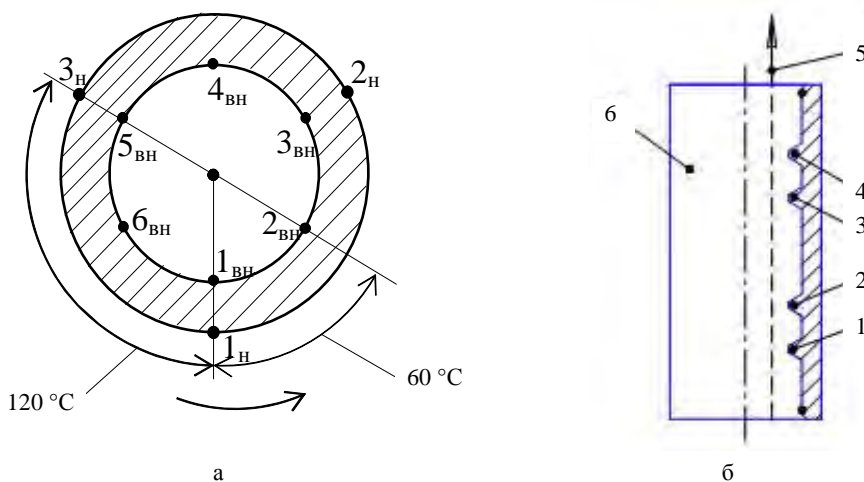


Рис. 7. Схема измерений профиля поверхности муфты ТМС: а – круговое сечение муфты: 1_н, 2_н, 3_н – точки пересечения соответствующих вертикальных линий измерения 1, 2, 3 с наружной поверхностью муфты; 1_{вн}, 2_{вн}, 3_{вн}, 4_{вн}, 5_{вн}, 6_{вн} – точки пересечения соответствующих вертикальных линий измерения 1–6 с внутренней поверхностью муфты; б – продольное сечение муфты: 1–4 – уровни круговых изме-

рений (по поясам муфты); 5 – направления движения шупа; 6 – муфта

В результате измерения кругового профиля на экран монитора и на печать выдавались профилограммы внутренней или наружной поверхности муфты, а также параметры профилограмм, из которых определяли:

- максимальное отклонение от круглости, $R_{\max}^{\text{рад}}$ (параметр «пик-впадина»);
- боковую длину уплотняющего пояса муфты $H_{\text{бок}}$;
- максимальное отклонение от прямолинейности $R_{\max}^{\text{лин}}$.

В табл. 3 представлены результаты статистической обработки значений параметров $R_{\max}^{\text{рад}}$, $H_{\text{бок}}$, $R_{\max}^{\text{лин}}$, полученных при измерениях профиля наружной и внутренней поверхности муфт, изготовленных из сплава Ti-Ni-Nb партии № 72, после дорнования муфт с различными скоростями.

Дополнительно проведен линейный корреляционный анализ [4] зависимости средних значений параметров $R_{\max}^{\text{рад}}$, $H_{\text{бок}}$, $R_{\max}^{\text{лин}}$ от скорости дорнования муфт (см. рис. 8).

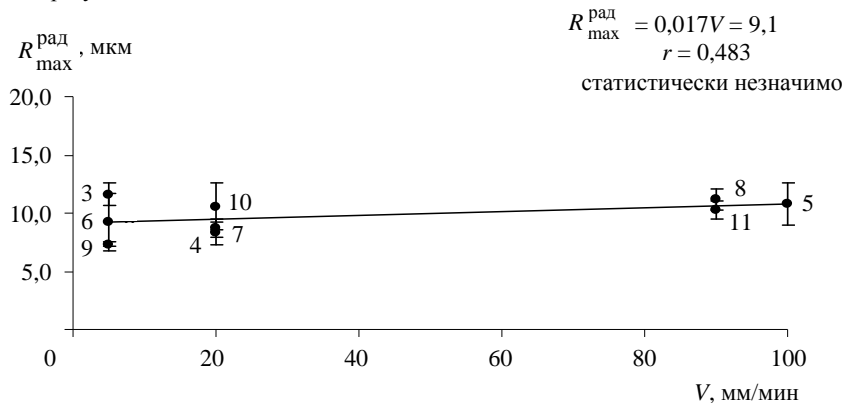
Статистический анализ результатов испытаний (с применением методов Фишера и Стьюдента и предположением о линейной корреляционной зависимости между исследуемыми величинами) показал, что при измерении геометрических параметров профиля наружной и внутренней поверхностей муфт, изготовленных из прессованного сплава Ti-Ni-Nb партии № 72, после их дорнования с различными скоростями ($V = 5, 20, 90, 100$ мм/мин) наблюдается слабая тенденция изменения параметров $R_{\max}^{\text{рад}}$, $H_{\text{бок}}$, $R_{\max}^{\text{лин}}$ с увеличением скорости дорнования. Однако статистически значимого влияния скорости дорнования на геометрические параметры термомеханических муфт не выявлено.

Таблица 3

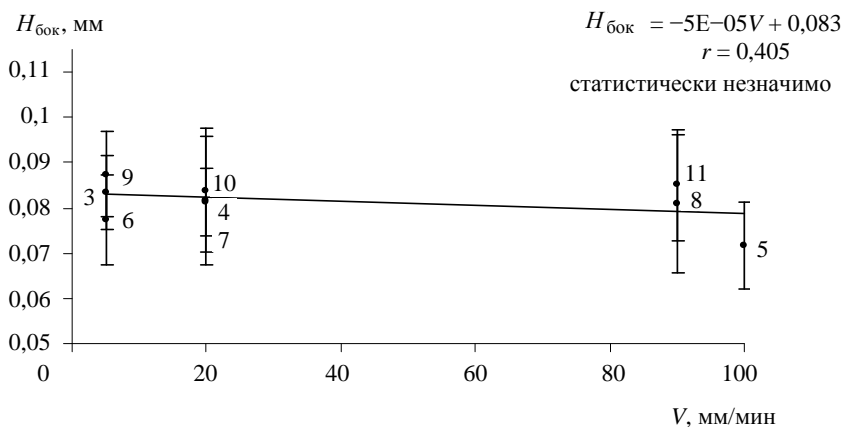
Результаты статистической обработки значений геометрических параметров $R_{\max}^{\text{рад}}$, $H_{\text{бок}}$, $R_{\max}^{\text{лин}}$, полученных при измерениях профиля наружной и внутренней поверхностей муфт после дорнования с различными скоростями

V , мм/мин	№ муфты	Среднее значение	Объем выборки n	СКО	Коэффициент вариации, %
$R_{\max}^{\text{рад}}$, мкм					
5	3	11,6	4	0,99	9
	6	9,3	4	2,44	26
	9	7,3	3*	0,21	3
20	4	8,3	4	0,98	12
	7	8,7	4	0,77	9
	10	10,6	4	2,05	19
90	8	11,2	4	0,87	8
	11	10,3	4	0,80	8
100	5	10,8	4	1,81	17
$H_{\text{бок}}$, мм					
5	3	0,084	24	0,0082	10
	6	0,077	24	0,0100	13
	9	0,087	24	0,0095	11
20	4	0,082	24	0,0143	17
	7	0,081	24	0,0076	9
	10	0,084	24	0,0137	16
90	8	0,081	24	0,0152	19
	11	0,085	24	0,0122	14
100	5	0,072	24	0,0096	13
$R_{\max}^{\text{лин}}$, мм					
5	3	0,036	12	0,0079	22
	6	0,031	12	0,0064	21
	9	0,039	12	0,0097	25
20	4	0,034	12	0,0080	24
	7	0,036	12	0,0060	17
	10	0,036	12	0,0042	12
90	8	0,035	12	0,0120	34
	11	0,035	12	0,0127	36
100	5	0,30	12	0,0077	26

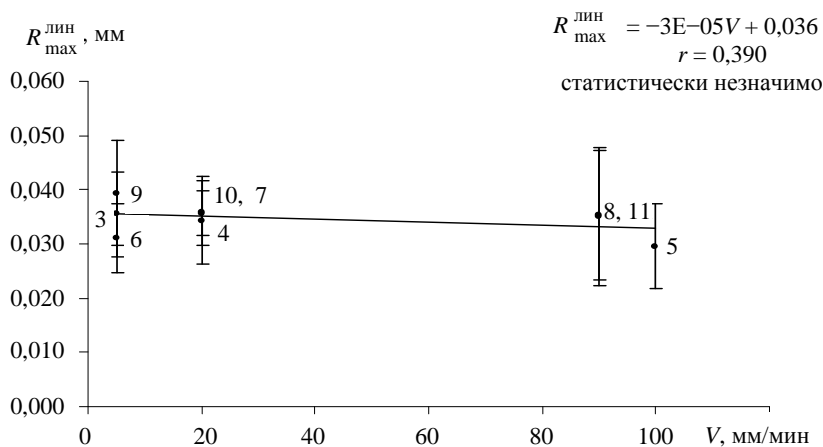
* – значение $R_{\max}^{\text{рад}} = 8,8$ мкм (муфта № 9) отбраковано в результате проверки по критерию Смирнова для отбрасывания резко выделяющихся результатов испытаний [4].



а



б



в

Рис. 8. Зависимость средних значений параметров $R_{\max}^{\text{рад}}$, $H_{\text{бок}}$, $R_{\max}^{\text{лин}}$ термомеханических муфт, изготовленных из прессованного сплава Ti-Ni-Nb партии № 72, от скорости дорнования муфт V ; 3–11 – номера муфт

Исследование влияния скорости дорнования муфт из сплава Ti-Ni-Nb на герметичность и несущую способность термомеханических соединений трубопроводов

С целью исследования влияния скорости дорно-

вания муфт V , а именно: 5, 20, 90 мм/мин на герметичность (P) и несущую способность (Q) с последующей статистической обработкой полученных результатов экспериментов было испытано 7 макетов ТМС с муфтами из сплава Ti-Ni-Nb партии № 72 (в прессованном состоянии). Значения полученных результатов представлены в табл. 4.

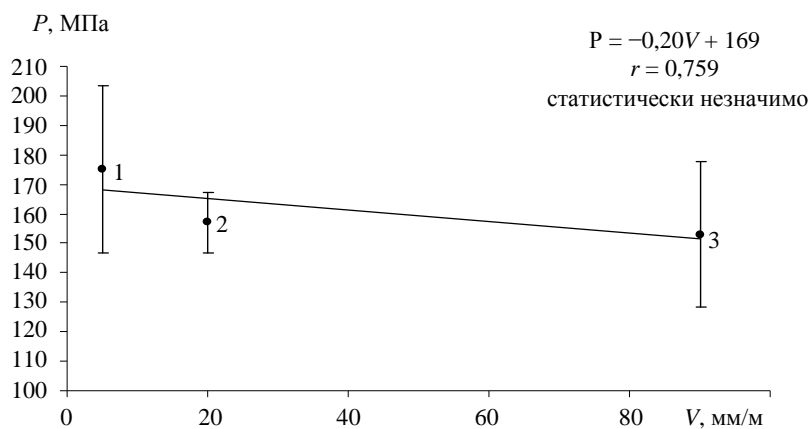
Дополнительно проведен линейный корреляционный анализ [4] зависимости средних значений P и Q , полученных при испытаниях на герметичность и

несущую способность макетов ТМС трубопроводов с муфтами из сплава Ti-Ni-Nb от скорости дорнования V муфт (см. рис. 9).

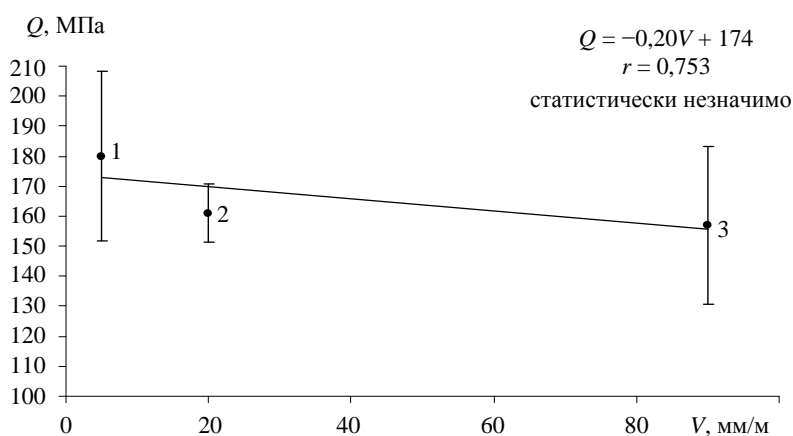
Таблица 4

Результаты статистической обработки значений герметичности и несущей способности термомеханических соединений трубопроводов с муфтами, изготовленными из прессованного сплава Ti-Ni-Nb партии № 72

Параметры статистической обработки	Выборка № 1 ($V = 5$ мм/мин)	Выборка № 2 ($V = 20$ мм/мин)	Выборка № 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	24,8
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



а



б

Рис. 9. Зависимость средних значений P (а) и Q (б), полученных при испытаниях на герметичность и несущую способность термомеханических соединений трубопроводов с муфтами, изготовленными из прессованного сплава Ti-Ni-Nb партии № 72, 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 гер-

метичность и несущую способность показал, что для ТМС трубопроводов с муфтами, изготовленными из прессованного сплава Ti-Ni-Nb партии № 72, статистически значимого влияния скорости дорнования V муфт на значения герметичности P и несущей способности Q не выявлено.

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

Для муфт, изготовленных из сплава Ti-Ni-Nb партии № 72 в прессованном состоянии, в табл. 5 приведены значения трудоемкости Tr (времени, затраченного на дорнование одной муфты) и производительности труда Π_T (выработки в единицу времени – час) при непосредственном дорновании муфты (Tr' и Π_T'), а также с учетом времени установки, охлаждения муфты до температуры минус 60 °С в парах жидкого азота (~10 мин) и времени дорнования муфты в устройстве Л429 (Tr и Π_T). Прогнозируемую производительность труда определяли по следующей формуле:

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

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

Т а б л и ц а 5

Средние значения трудоемкости и производительности труда в процессе дорнования муфт в устройстве Л429, изготовленных из прессованного сплава Ti-Ni-Nb партии № 72 при различных скоростях V

V , мм/мин	Количество муфт n	При непосредственном дорновании муфты		При установке, охлаждении и дорновании муфты	
		Tr' , мин	Π_T' , муфт/час	$Tr = Tr' + 10$, мин	Π_T , муфт/час
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

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

Поскольку скорость дорнования не оказывает статистически значимого влияния на геометрические параметры термомеханических муфт, изготовленных из прессованного сплава системы Ti-Ni-Nb партии

№ 72, на герметичность и несущую способность макетов ТМС трубопроводов, то производительность труда в технологии термомеханических соединений трубопроводов можно существенно повысить за счет увеличения скорости дорнования муфт.

Выводы

1. В данной работе кратко представлены результаты исследований свойств сплава с памятью формы системы Ti-Ni-Nb партии № 72 (в прессованном состоянии) с широким мартенситным гистерезисом, которые подтвердили пригодность данного сплава для использования его в качестве материалов муфт для термомеханического соединения трубопроводов.

2. Установлено, что увеличение скорости дорнования от 5 до 90 мм/мин не приводит к статистически значимому изменению геометрических параметров профиля наружной и внутренней поверхности муфт, изготовленных из сплава Ti-Ni-Nb, а также герметичности и несущей способности макетов ТМС трубопроводов диаметром 12 мм данными муфтами.

3. При разработке прогрессивной технологии ТМС трубопроводов муфтами из сплава Ti-Ni-Nb для трубопроводов диаметром 12 мм средние значения полученных при испытаниях величин давления герметичности составили 160 МПа, несущей способности – 165 МПа.

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

5. Поскольку скорость дорнования не оказывает статистически значимого влияния на геометрические параметры муфт, изготовленных из сплава Ti-Ni-Nb, а также на герметичность и несущую способность макетов ТМС трубопроводов данными муфтами, то производительность труда в технологии термомеханических соединений трубопроводов можно существенно повысить за счет увеличения скорости дорнования муфт.

Литература

- Чернов Д. Б., Паперский А. П., Хасьянов У. и др. Термомеханические соединения элементами «с памятью формы» // Авиационная промышленность. 1984. № 6. С. 6–8.
- 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.
- Петроченко П. Ф., Лясников И. А. Экономика труда в промышленности: Учеб. пособие для экон. вузов и фак. М.: Экономика, 1979.
- Степнов М. Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний. М.: Машиностроение, 1985.