
**НАДЕЖНОСТЬ, ПРОЧНОСТЬ, ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ
МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ**

УДК 621.79.05

**ТЕХНОЛОГИЯ РАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБОПРОВОДОВ,
ИСПОЛЬЗУЮЩИХ АРМАТУРУ ИЗ СПЛАВОВ
С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ**© 2022 г. У. Х. Угурчиев^{1,*}, Н. Н. Новикова^{1,**}¹*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия***e-mail: umar77@bk.ru****e-mail: natalnn3@mail.ru*

Поступила в редакцию 26.08.2021 г.

После доработки 03.02.2022 г.

Принята к публикации 11.02.2022 г.

В статье представлен обзор технологических процессов создания соединений трубопроводов, а также рассмотрены различные конструкции разъемных термомеханических соединений, их особенности и применение для высоконагруженных трубопроводов.

Ключевые слова: эффект памяти формы, муфта, термомеханическое соединение, сверхупругость

DOI: 10.31857/S0235711922030117

Трубопроводы – это устройства, по которым транспортируются жидкие, газообразные и сыпучие вещества. Их использование в машиностроении крайне велико. Безотказность работы машин во многом зависит от надежности трубопроводов и их соединений.

Соединения трубопроводов являются нагруженными элементами коммуникаций и в зависимости от их назначения и условий работы, определяется тип соединений и его эксплуатационные характеристики. Для изделий авиационной промышленности уделяется особое внимание следующих показателей: трудоемкость изготовления элементов соединения, простота их монтажа и периодичность контроля с регламентными работами по обеспечению герметичности [1]. Оценка конструктивных характеристик соединений осуществляется по эффективному коэффициенту концентрации напряжений

$$\beta_{\text{соед}}^{-1} = \sigma_{\text{тр}}^{-1} / \sigma_{\text{соед}}^{-1} \rightarrow 1. \quad (1)$$

Такой коэффициент в зависимости от пределов выносливости $\sigma_{\text{тр}}^{-1}$ трубы в состоянии поставки, и выносливости соединения $\sigma_{\text{соед}}^{-1}$ должен мало отличаться от единицы.

Исходными заготовками для ответственных трубопроводов служат бесшовные холоднотянутые и холоднотемпированные трубы из нержавеющей стали марки 12X18H10T, ВНС2, титановых сплавов ОТ4, 7М. Наиболее распространенными разъемными соединениями с исполнительными устройствами, переходниками, тройниками, штуцерами являются ниппельные конструкции с накидными гайками [2]. Если герметичность соединений в процессе эксплуатации может обеспечиваться периодической подтяжкой, то предел выносливости, зависящий от условий контакта ниппеля

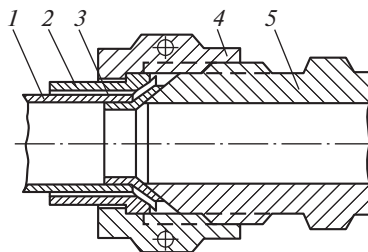


Рис. 1. Ниппельное соединение: 1 – труба; 2 – ниппель; 3 – прокладка; 4 – накидная гайка; 5 – штуцер.

с трубой, определяется совершенствованием конструкций. На рис. 1 схематически представлено ниппельное соединение. Согласно статистике, для таких соединений более 50% отказов приходится на места перехода развальцовки части 3 цилиндрической трубы в коническую, т.е. в районе развальцовки трубопровода и в контактной зоне ниппеля 2 с трубой 1.

Основными причинами отказов являются поперечные колебания близлежащих участков трубопровода. Если между внутренней поверхностью (рис. 1) ниппеля 2 и внешним диаметром трубы 1 существует зазор, то поперечные колебания вызывают изгиб у основания конуса 3 и фреттинг-коррозию у среза ниппеля и как следствие, низкий предел выносливости σ^{-1} такого ниппельного соединения (рис. 2, линия 1), σ_{\max} , кГ/мм².

В процессе развальцовки, у основания конуса образуется утончение и в сочетании с поперечными колебаниями трубы и неравномерностям от монтажных напряжений приводит к снижению прочности соединений и к возможным разрушениям (рис. 3).

Предел выносливости соединений в значительной степени зависит от величины зазора между поверхностями трубы и ниппеля и имеет тенденцию к повышению при уменьшении зазора и обеспечения некоторого натяга. Предел выносливости σ^{-1} паяного соединения значительно увеличивается при снижении данного зазора (рис. 2, линия 3), а при применении беззазорной (обкатанной или обжимной) конусной прокладки 3 это увеличение для σ^{-1} составляет 30–40% (рис. 2, линия 4) [3].

Однако процесс пайки приводит к термическому воздействию на контактируемые материалы, а отсутствие зазора при обжиге приводит не только к заеданию в процессе монтажа при скольжении накидной гайки, но и к определенным затруднениям выполнения стабильных моментов затяжки для обеспечения герметичности. Соединения не нашли широкого применения.

Замена традиционных конструкционных материалов на сплавы TiNi с эффектом памяти формы (ЭПФ) при изготовлении ниппельной арматуры позволяет не только существенно повысить технологичность соединений, снизить трудоемкость монтажных и регламентных работ, но и достичь предела выносливости соединений около 0.9 от предела выносливости труб в состоянии поставки. Такие характеристики обеспечиваются за счет создания беззазорного соединения труб с ниппельной арматурой, обеспечивая гарантированный натяг, а также предотвращая возможность возникновения фреттинг-коррозии из-за наличия демпфирующих элементов в переходной зоне трубы и ниппеля.

Проявление в интервале эксплуатационных температур эффекта сверхупругости (СУ) [4] позволяет решать задачу поддержания высокой степени герметичности в результате обеспечения постоянства напряжений в резьбовой части соединения. Напряжения момента затяжки сохраняются на стабильном уровне независимо от темпе-

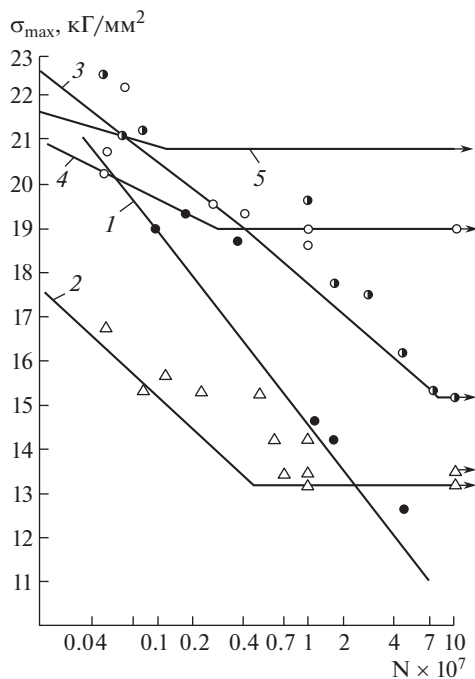


Рис. 2. Зависимость предела выносливости соединения (максимального напряжения в цикле, σ_{\max}) от переносных колебаний, N – число циклов.

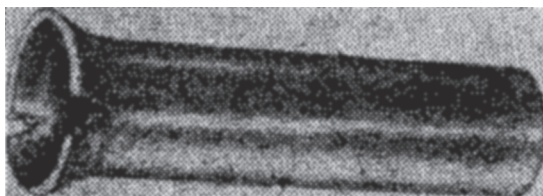


Рис. 3. Фотография разрушения трубопровода.

ратурных колебаний из-за разности коэффициентов термического расширения и скачков механического воздействия.

Уникальные характеристики возникают за счет фазовых превращений, которые способны в узком интервале температур 2–40°C и действии напряжений, осуществлять обратимые термоупругие превращения.

В зависимости от соотношения компонентов, методов переработки для каждого конкретного сплава интервалы температур фазовых превращений и действующие при этом напряжения существенно отличаются.

На рис. 4 схематически, представлены условия проявления ЭПФ, СУ в зависимости от внешних напряжений σ_r , и температуры T .

На рис. 4 представлены случаи максимального и минимального значений критических напряжений σ_r . При min значениях напряжения σ_r проявляется широкая область

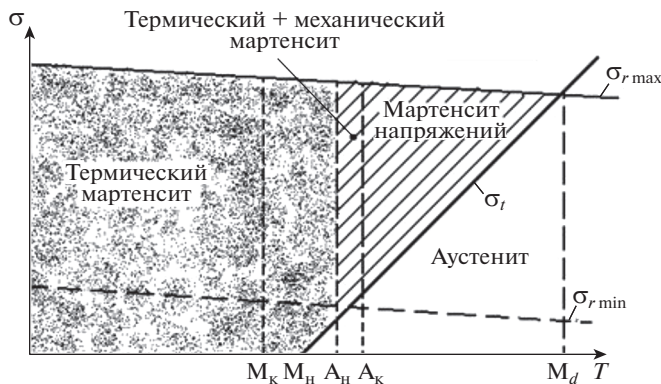


Рис. 4. Зависимость проявления свойств сплава с ЭПФ: M_d – температура, с которой начинается “смягчение” решетки аустенитной фазы, которая сопровождается термической неустойчивостью решетки к сдвиговому превращению; M_H , M_K – температуры начала и конца мартенситного превращения; A_H , A_K – температуры начала и конца аустенитного превращения; σ_l – предел текучести В2 фазы; σ_r – действующие (внешние) критические напряжения.

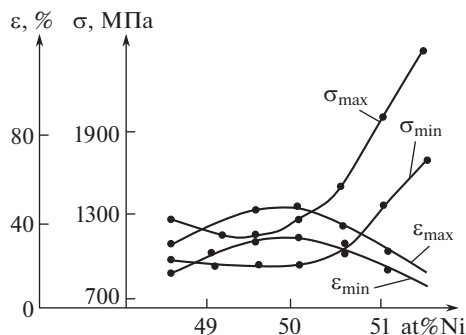


Рис. 5. Зависимость термомеханических характеристик сплавов от соотношения компонента Ni в сплаве.

ЭПФ и некоторая доля СУ, но только СУ без ЭПФ существовать не может, т.к. при температуре выше A_K и пределе текучести σ_l возникает пластическая деформация (скольжение) аустенитной В2 фазы. Если σ_l – предел текучести В2 фазы, при температурах выше A_K значительно возрастает, то при температурах до M_d не только проявляется эффект СУ, но и при реализации ЭПФ, увеличиваются генерируемые напряжения термомеханического возврата σ_R и степень восстановления формы. Повышение пределов текучести материала σ_l возможно как металлургическим (изменением соотношения $Ti \leftrightarrow Ni$ компонентов и введением легирующих элементов), так и термомеханическими воздействиями и фазовым наклепом.

На рис. 5 представлены термомеханические характеристики сплавов в зависимости от соотношения основных компонентов Ti и Ni.

С целью обеспечения высокой степени возврата формы ϵ для соединительных элементов типа муфт термомеханических соединений (ТМС), большой величины генерируемых напряжений σ_R и проявления эффектов СУ, необходимо применять сплавы

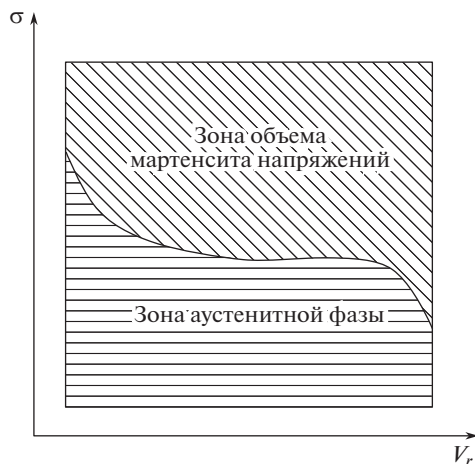


Рис. 6. Зависимость объема превращения V_r сплава от напряжений σ_R .

с концентрацией никеля более 50.5 ат. % Ni и дополнительно легированные железом более 3 ат. % Fe. При этом разность между пределом текучести σ_f и величиной критических сдвигов $\sigma_{f \min}$ должна составлять не менее 400 МПа. На рис. 5 представлены характеристики сплавов в зависимости от концентрации ат. % Ni.

Для материалов, проявляющих свойства СУ, особо следует отметить, что воздействие на аустенитную В2 фазу при изотермических условиях внешними σ_f или внутренними (от генерации) σ_R напряжениями в интервалах температур $A_n \leftrightarrow M_d$ сопровождается фазовыми превращениями некоторого объема аустенита (В2) \leftrightarrow в мартенсит напряжений (В19^{II}). В зависимости от интенсивности напряжений или колебания их величин изменяются (возрастают или снижаются) объемы превращающегося В2 \leftrightarrow В19^{II}. Схематично эти изменения представлены на рис. 6. Деформирования при температурах выше M_d происходят, как и для конструкционных материалов, скольжением. В этом случае проявления ЭПФ или СУ не наблюдаются.

На основании характеристик материалов, обладающих ЭПФ и СУ по обеспечению высокой надежности неразъемных ТМС, разработаны конструкции ниппельных соединений из этих сплавов [5]. Преимущества данных конструкций по сравнению со сварными или паяными соединениями состоят в том, что в результате термического влияния отсутствует заметное разупрочнение материала труб, нет необходимости в зачистке сварных или паяных швов и проведения рентгеноконтроля.

На рис. 7 представлены особенности по термомеханической установке элементов арматуры из TiNi с трубами для последующего монтажа разъемных соединений трубопроводов диаметрами от 6 до 20 мм. Внешний контур арматуры (ниппелей системы “конус по конусу” и “сфера по конусу”) соответствует контуру для конструкционных материалов и позволяет применять традиционные способы монтажа. Внутренняя поверхность соответствует размерам и требованиям муфт ТМС.

Установленная при нагреве радиально деформированная арматура осуществляет обжим поверхности труб, образуя прочный и беззазорный контакт. В зоне контакта аустенитной (В2) фазы арматуры с трубой образуется упруго напряженное состояние, стимулирующее фазовые превращения с образованием мартенсита напряжений (В19^I). Характерной особенностью существования В19^I является его зависимость от

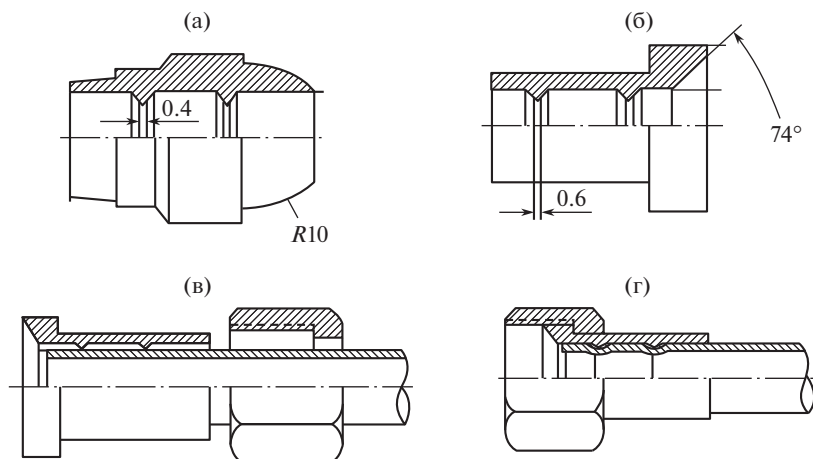


Рис. 7. Соединения nipples из сплава с ЭПФ: (а) – nipple для соединения по внутреннему контуру; (б) – nipple для соединения по наружному контуру; (в) – процесс монтажа; (г) – готовое соединение.

интенсивности действующих напряжений. Если напряжения от термических (влияние коэффициента термического расширения (КТР)) или механических воздействий изменяются (возрастают \leftrightarrow снижаются), то увеличивается \leftrightarrow уменьшается содержания В19¹ в массиве В2 на ту величину, на которую изменяются действующие напряжения, стабилизируя на некоторой величине упруго напряженное состояние.

Наиболее высокую надежность по обеспечению герметичности, при минимально допустимых моментах затяжки, показывают разъемные соединения по внутреннему конусу с углом 24° и сферическим nippleм.

Результаты испытаний на базе 10^7 циклов по определению предела выносливости со стороны nipple под нагрузкой 180–230 МПа показали, что они находятся в пределах примерно 0.95 от предела выносливости трубы в состоянии поставки.

Значительные преимущества таких соединений состоят в том, что герметичность в аналогичных условиях создается при сравнительно меньших моментах затяжки, чем для традиционной арматуры.

Особо следует отметить, что σ_R – минимальные значения критических напряжений мартенситного сдвига, достаточные для фазовых превращений типа В2 \leftrightarrow R \leftrightarrow В19¹ и составляют 250–300 МПа и зависят от предела текучести σ_T матрицы TiNi [6]. Например, для nippleльного соединения со штуцером из конструкционных материалов резьбовой гайкой М14, момент затяжки должен находиться в пределах 1500–3000 Н см [7]. В этом случае контактные напряжения составят 550–600 МПа, что значительно превышает σ_R – напряжений фазового превращения. Следовательно, для арматуры из сплава с ЭПФ момент затяжки обеспечивает надежную герметичность, которая составляет 500–2500 Н см. Температурно-циклические (от –60 до 200°С) испытания с пульсирующим давлением и многократной (до 10 раз) переборкой с проворотом не влияют на прочность и герметичность соединений. Для обеспечения герметичности при термических колебаниях размеров отпадает необходимость в периодических подтяжках. Преимущества термомеханических соединений, в сочетании с высокой коррозионной стойкостью при всеклиматических условиях, исключают необходимость использования квалифицированных операторов по монтажу, а также отсутствует тер-

мическое или электромагнитное воздействие на окружающие устройства, что позволяет характеризовать данные соединения как надежные и высокотехнологичные.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Хасьянова Д.У.* Дис. ... канд. техн. наук. Москва: МГУПИ, 2012.
2. *Сапожников В.М.* Монтаж и испытания гидравлических и пневматических систем летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1979. 158 с.
3. *Lotkov A., Grishkov V., Timkin V., Baturin A., Zhapova D.* Yield stress in titanium nickellide-based alloys with thermoelastic martensitic transformations. *Materials Science and Engineering A*. 2019. V. 744. P. 74.
4. *Khasyanova D.U.* Conditions for Operational Reliability and Tightness of Thermomechanical Joining Pipelines Using Couplers // *J. Mach. Manuf. Reliab.* 2020. V. 49. № 2. <https://doi.org/10.3103/S1052618820020089>
5. *Kang G.Z., Kan Q.H., Yu C., Song D., Liu Y.J.* Whole-life transformation ratchetting and fatigue of super-elastic NiTi Alloy under uniaxial stress-controlled cyclic loading // *Materials Science and Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*. 2012. V. 535. P. 228. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.12.071>
6. *Khasyanova D.U.* The control features of thermal characteristic details from alloy with shape memory effect // *Journal of Physics: Conference Series. VIII International Conference "Deformation and Fracture of Materials and Nanomaterials"*. 2020. 012062. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1431/1/012062>
7. *Kajiwara S.* Characteristic features of shape memory effect and related transformation behavior in Fe-based alloys // *Materials Science and Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*. 1999. V. 273. P. 67. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(99\)00290-7](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(99)00290-7)