
НАДЕЖНОСТЬ, ПРОЧНОСТЬ, ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ

УДК 621.79.05

УСЛОВИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ И ГЕРМЕТИЧНОСТИ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБОПРОВОДОВ МУФТАМИ

© 2020 г. Д. У. Хасьянова

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

e-mail: dinara.khasyanova@mail.ru

Поступила в редакцию 28.01.2018 г.

Принята к публикации 25.12.2019 г.

В статье представлена методика исследований двух партий сплавов на основе Ti и Ni, обладающих эффектом памяти формы, с помощью которой были получены деформационные характеристики образцов сплава. На основании полученных результатов дана оценка применения сплавов с различными деформационными характеристиками для увеличения надежности и герметичности соединений трубопроводов с использованием муфт из сплава с эффектом памяти формы.

Ключевые слова: термомеханические соединения, эффект памяти формы, сверхупругость, мартенситное превращение, фазовые превращения, сплавы на основе TiNi

DOI: 10.31857/S023571192002008X

В результате анализа неисправностей летательных аппаратов было установлено, что на планер приходится до 12% отказов, а на бортовые системы их более 88% [1]. Трубопроводы являются “кровеносной” системой летательных аппаратов, обеспечивающие работоспособность, автоматизацию управления и контроль всего комплекса агрегатов и узлов. По безопасности полета наиболее важным является обеспечение надежности пневмо- и гидросистем самолета. Условия работоспособности отличаются по температуре эксплуатации (от –60 до +300°С) и давлению, которое может достигать до 500 атм. Трубопроводы гидравлических и топливных систем работают в наиболее трудных условиях эксплуатации. В результате пульсаций и гидравлических ударов трубопроводы подвержены вибрационным нагрузкам, они испытывают высокие циклические, динамические и монтажные напряжения. Суммарная протяженность трубопроводов для одного изделия может достигать нескольких километров. Обеспечение высокой эксплуатационной надежности трубопроводных систем и повышение конструктивно-технологических возможностей при снижении трудоемкости монтажно-сборочных работ – одно из приоритетных направлений в авиационной промышленности. Основные требования, которые предъявляются к соединениям трубопроводов, это обеспечение герметичности и надежности во всем интервале температур эксплуатации.

Соединения трубопроводов подразделяются на неразъемные и разъемные. Большинство неразъемных соединений изготавливаются сваркой или пайкой стыков из однородных материалов. После сварки в защитной среде, швы подвергаются зачистке от окалины и свищей. Снятие внутренних напряжений в сварном шве осуществляется термообработкой [2].

При пайке, качество соединений зависит от тщательности подготовки контактируемых поверхностей. Точность расположения арматуры относительно труб не должна

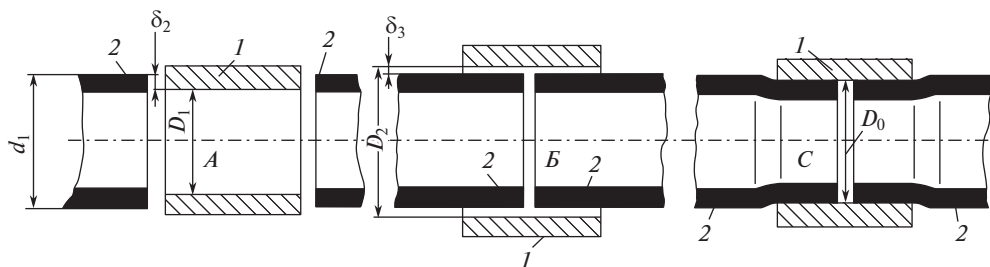


Рис. 1. Процесс создания соединения: *A* – исходное состояние соединяемых элементов; *B* – монтаж соединений; *C* – создание муфтой соединения; *1* – муфта ТМС; *2* – соединяемые трубы; D_1 и D_2 – исходный и деформированный диаметры муфты соответственно; D_0 – размеры труб и муфты после создания соединения; δ_2 – размер превышения между трубой и муфтой; δ_3 – зазор между муфтой и трубой.

превышать 0.2 мм, а радиальный зазор 0.05–0.15 мм. Надежность зависит от тщательности подготовки поверхностей комплектующих, оборудования и соответствующей квалификации обслуживающего персонала.

С целью снижения веса агрегатов, узлов и исполнительных механизмов требуется увеличение рабочего давления жидкости до 800 АТИ и обеспечение вакуумо- и водородоплотности.

Контроль скрытых дефектов, таких как частичное незаполнение шва, пористость, мелкие трещины в зоне шва или околошовной зоне обязательно проверяются рентгенопросвечиванием. При этом трудоемкость монтажно-сборочных и контрольных работ являются значительными.

Конструкция муфты и соединения ТМС. Одним из направлений по повышению работоспособности и снижению трудоемкости трубопроводных систем является применение муфт термомеханического соединения (ТМС) из материалов с эффектом памяти формы (ЭПФ). Муфта ТМС в процессе монтажа при определенных условиях, обладает свойством самовосстанавливаться, осуществляя целенаправленную работу по пластическому деформированию законцовок трубопроводов и расширяет технологические возможности сборки. Прочность соединений соответствует прочности труб. Данные соединения применимы для трубопроводов не только малых диаметров и толщин, но и для разнородных материалов. Их сборка может осуществляться в труднодоступных местах. Отсутствие термического влияния позволяет сохранять исходную прочность труб из нагартованного материала.

Соединительные муфты, после фазовых превращений материала радиально деформируются (в пределах до 8%) и до монтажа сохраняются в холодном состоянии. После монтажа происходит нагрев за счет естественного подвода тепла. В результате обратного превращения материала при нагреве происходит восстановление исходных размеров муфты [3].

Технологическая схема процесса создания неразъемного соединения трубопроводов муфтами ТМС, представлена на рис. 1. В исходном состоянии муфта ТМС имеет внутренний размер на величину δ_2 меньше, чем наружные размеры труб. Монтаж соединений производится с гарантированным зазором δ_3 .

Характерной особенностью для данных соединений является работа, которую осуществляет сам материал муфты. Величины и условия напряжений, генерируемых в материале муфты, определяются свойствами и последовательностью фазовых превращений. Надежность и герметичность определяются конструктивными параметрами муфты и технологическими процессами изготовления и монтажа.

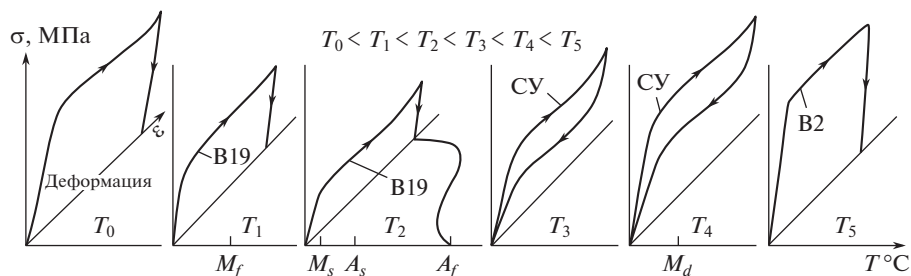


Рис. 2. Деформационные характеристики материала в зависимости от температуры: M_s и M_f — температуры начала и конца мартенситных превращений; A_s и A_f — температуры аустенитных превращений; M_d — температура, ниже которой механические напряжения стимулируют МП; σ — напряжение термомеханического возврата; ϵ — деформация; B19 — мартенситная и B2 — аустенитная фазы; CY — сверхупругость.

Исследование сплава с ЭПФ, применяемый в соединительных муфтах ТМС. Из всех известных в настоящее время материалов с ЭПФ, никелид титана (сплав на основе TiNi) обладает наиболее высокими механическими, технологическими и коррозионными свойствами. В зависимости от соотношения компонентов Ti, Ni и легирующих элементов, фазовые превращения в сплавах могут происходить при температурах от -200 до $+100^\circ\text{C}$.

По отношению к нормальной температуре, сплав может находиться в аустенитном (B2) или мартенситном (B19) состоянии. В промышленности принято маркировать сплавы, находящиеся в аустенитном состоянии — ТН1, а мартенситном — ТН1К. Следовательно, для трубопроводов с температурой эксплуатации от -60°C фазовые превращения в муфтах ТМС должны проходить при температурах ниже -60°C .

В процессе работы авторами были получены зависимости деформационных характеристик сплава с эффектом памяти формы в зависимости от температурных условий. Деформационное поведение материала и виды проявляемых эффектов в зависимости от температуры представлены на рис. 2. При температурах T_0 и T_1 (ниже температуры МК) сплав находится в мартенситном (B19) состоянии. Деформированный материал в пределах 8% — “мартенситной неупругости” при нагреве является формообратимым (рис. 2) при T_2 . При температурах T_3 и T_4 — аустенитное состояние, где проявляется эффект сверхупругости, который характеризуется стабильной величиной напряжений возврата в пределах от 2 до 6%. Температура T_5 (выше M_d — верхний предел температуры эксплуатации) характеризует такое аустенитное состояние, деформация которого приводит к необратимой пластичности.

Уникальные свойства сплавов с ЭПФ проявляются не только в том, что они обладают свойством “памяти формы”, но и обладают сверхупругостью (СУ), которая может достигать до 10% от деформации. Эта деформация может проявляться в окрестностях интервалов мартенситных превращений (МП), а при соответствующих металлургических и термомеханических переработках, распространяться до температур на 200°C превышающих интервал обратного МП. Следовательно, можно иметь конструкции из материалов, обладающих свойством СУ в интервале температур эксплуатации. Это явление связано с особым ромбоэдрическим (R) превращением. Исследования электронной структуры и структурной неустойчивости TiNi, проведенные А.И. Лотковым [4] показывают, что ромбоэдрическому превращению предшествует переход с изменением локализации электронов и изменением топологии поверхности Ферми. Уровень Ферми в TiNi расположен в окрестностях состояния острой плотности. Поэтому, даже небольшое повышение или снижение концентрации электронов или их перераспре-

деление по энергии, приводит к изменению концентрации атомов Ni в матрице и изменению температур превращения.

Целенаправленную работу восстановления муфты при нагреве осуществляет сам материал. Генерируемые напряжения, в процессе восстановления размеров, определяются видами и последовательностями фазовых превращений.

Методика определения деформационных характеристик для образцов, изготовленных из различных партий сплавов ТН1 и ТН1К. Определение деформационных (термомеханических) характеристик σ (напряжение термомеханического возврата) ϵ (деформирование) осуществлялось на гладких разрывных образцах, изготовленных из сплавов ТН1 и ТН1К.

Характеристики термомеханического возврата σ зависят от вида предварительной деформации, поэтому схема нагружения образцов в мартенсите должна по возможности имитировать поведение силового элемента в узле [5].

Испытания производились в соответствии с требованиями ГОСТ 9651-92 при растяжении на специальной установке для измерения характеристик возврата на габаринских образцах при заданной деформации ϵ . Исследование напряжений сопротивления деформирования (напряжения термомеханического возврата) растяжением материала σ в пределах до 10% осуществлялось при фиксированной температуре в интервале от МП до -196°C и скоростью 0.2 сек^{-1} . Заданная температура деформирования производилась за счет интенсивности подачи паров азота, или нагрева трубчатой печи. При достижении заданной степени деформации осуществлялась разгрузка машины до величин 0–10 МПа, выдержка 1–2 мин и последующий нагрев.

Результаты проведенных испытаний для определения термомеханических характеристик образцов, изготовленных из сплава ТН1 (Ti-51%atNi) и ТН1К (Ti-47.5%atNi-2.5%at.Fe). Процессы, происходящие при восстановлении стандартных образцов для различных материалов, представлены на рис. 3, 4. Деформированные при температурах ниже M_f образцы, в условиях жесткого противодействия, нагревались до температур, превышают температуру A_f . Нагруженные внутренними напряжениями образцы (точка А), с регистрацией действующих усилий выдерживались в течение 120 час.

Для сплавов, ТН1 и ТН1К, в которых деформированный мартенсит (В19) непосредственно трансформируется в аустенитную (В2) фазу, при температурах несколько превышающих интервал превращений, образуется доля мартенсита напряжений (В19'), которая обладает пониженным эффектом СУ. Процесс фазовых превращений в сплаве реализуется по схеме: $\text{В19} \rightarrow \text{В19}' + \text{В2} \rightarrow \text{В2}$. При дальнейшем повышении температур или снижении действующих напряжений, мартенсит напряжений В19' постепенно превращается в аустенитную В2 фазу.

Длительная выдержка в течение 120 часов показывает, что действующие напряжения снижаются от 450 до 150 МПа. При снятии противодействия наблюдается недовосстановление в пределах 4–4.5%. Дополнительный нагрев до 200°C способствует к частичному восстановлению деформации (точка Д). Однако остаточная (пластическая) деформация (кривая Д–О) в пределах 1.5% не восстанавливается даже при нагреве до 300°C . Такое поведение материала вероятно связано с реализацией в мартенсите напряжений релаксационных процессов осуществляемых путем пластического сдвига.

В сплавах ТН1К, с повышенным содержанием Ti и дополнительно легированных Fe, деформированный мартенсит (В19) при нагреве трансформируется в аустенитную фазу по схеме $\text{В19}' \rightarrow \text{В19}' + \text{R} \rightarrow \text{R} \rightarrow \text{В2}$. Мартенсит напряжений В19' и R фаза обладают СУ, которая может существовать и в интервале температур эксплуатации (рис. 4).

В этом случае, величина генерируемых напряжений в зависимости от длительности выдержки, снижаются незначительно и составляют примерно до 450 МПа (рис. 4, точка В). Снятие противодействия реализуется с эффектом СУ (по линии В–С) без остаточного недовосстановления.

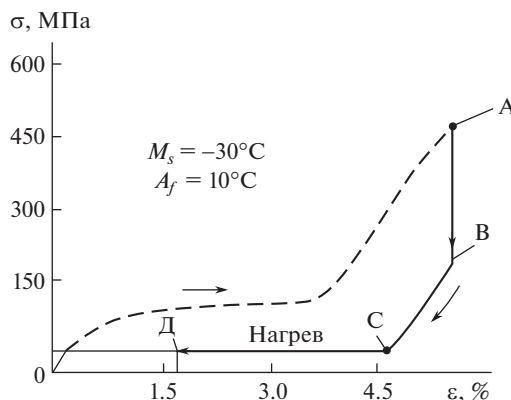


Рис. 3. Деформационные характеристики поведения сплава ТН1 (Ti + 51 ат% Ni): пунктирной линией показан процесс нагружения мартенсита; температура выдержки 20°C; А–В — падение напряжений во время выдержки; В–С — снятие нагрузки; С–Д — возврат формы при дополнительном нагреве; Д–О — остаточная (пластическая) деформация.

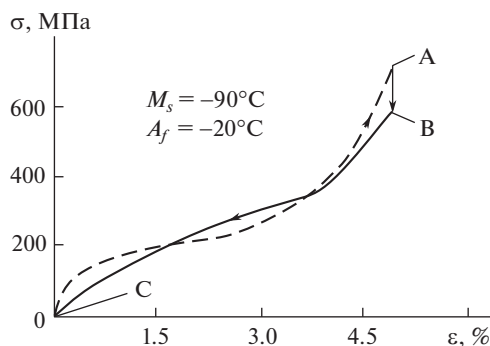


Рис. 4. Деформационные характеристики поведения сплава ТН1К (Ti + 48 ат% Ni + 2 ат% Fe): пунктирной линией О–А показан процесс нагружения мартенсита; температура выдержки 20°C; А–В — падение напряжений во время выдержки; В–С — снятие нагрузки.

Обсуждение результатов. Соединения трубопроводов в процессе эксплуатации циклически подвергаются термическим воздействиям от -60 до $+300^\circ\text{C}$. При различных температурах, контактируемые размеры трубопроводов колеблются в зависимости коэффициентов термического расширения [6]. В связи с тем, что величина упруго напряженного состояния термомеханических соединений зависит от размеров недовосстановления, термические колебания контактируемых размеров провоцируют релаксационные процессы, которые влияют на эксплуатационную надежность ТМС.

Муфты из сплавов, в которых СУ состояние при температурах эксплуатации отсутствует, а величина недовозврата превышает 5%, при термоциклировании наблюдается снижение степени герметичности.

Высокой надежностью и герметичностью обладают соединения из тех сплавов, в которых проявляется эффект СУ при температурах эксплуатации. В этом случае, любые термические колебания размеров деталей компенсируются сверхупругостью.

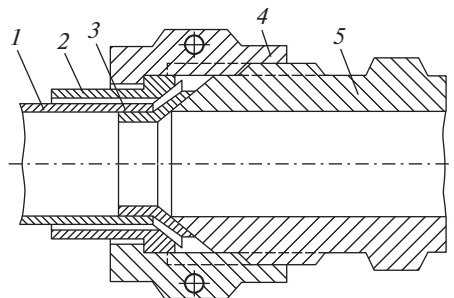


Рис. 5. Ниппельное соединение: 1 – труба; 2 – ниппель; 3 – прокладка; 4 – накидная гайка; 5 – штуцер.

Контактная нагрузка и уровень напряженного состояния в термомеханических соединениях зависит от величины деформации недовосстановления. При эксплуатационных колебаниях температур, размеры контактируемых поверхностей соединения изменяться в зависимости от коэффициентов термического расширения. В зоне контакта термические нагрузки влияют на стабильность термомеханических напряжений, которые определяют эксплуатационную надежность соединений. Особо существенно это относится к разъемным (фитинговым и ниппельным) соединениям. После определенного времени из-за термических и температурных колебаний происходит расслабление соединений. В таких случаях необходимо осуществлять подтяжку (рис. 5). Использование ниппелей или фитингов из сплавов с ЭПФ, обладающих СУ, позволяет осуществлять постоянство напряжений в зоне контакта при более низких значениях практически для всего периода эксплуатации.

Выводы. СУ деформирование до 6%, при снятии нагрузки, приводит к полному восстановлению размеров. Действующие при этом напряжения деформирования и восстановления примерно одинаковы и составляют 350–400 МПа. Увеличение деформирования до 8% сопровождается резким повышением напряжений сопротивления, неполным проявлением СУ и появлением необратимой пластичности. Дальнейшее повышение степени деформирования приводит к превалированию пластичности над СУ. Напряжения, при реализации остаточной СУ, несколько снижаются и составляют примерно 300 МПа. Следовательно, для обеспечения высокой надежности, в соединениях муфтами ТМС необходимо применение сплавов, обладающих СУ в интервале температур эксплуатации. Остаточная величина недовосстановления должна находиться в пределах от 2–5%. В этом случае, действующие в зоне контакта напряжения термомеханического возврата будут стабильны и независимы от термических колебаний.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Автор выражает благодарность Хасьянову Усману за обсуждение материалов исследований и испытаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хасьянова Д.У. Применение материалов с эффектом памяти формы для соединения трубопроводов в авиационной промышленности. Авиационная промышленность. 2016. № 3. С. 37.
2. Хасьянова Д.У. Технологическое обеспечение качества изготовления муфт ТМС и сборки трубопроводов. Диссертация на соиск. уч. степ. канд. наук. МГУПИ, Москва, 2012г. 115 с.

-
3. Lotkov A., Grishkov V., Timkin V., Baturin A., Zhapova D. Yield stress in titanium nickelide-based alloys with thermoelastic martensitic transformations. *Materials Science and Engineering A*. 2019. V. 744. P. 74
 4. Lotkov A.I., Kuznetsov A.V. Elastic properties of Ti-Ni single crystals preceding $B2 \rightarrow B19'$ and $B2 \rightarrow R \rightarrow B19'$ martensitic transformations. *Physics of Metals and Metallography*. 1988. V. 66 (5). P. 65
 5. Шишкин С.В., Махутов Н.А. Расчет и проектирование силовых конструкций на сплавах с эффектом памяти формы. Ижевск: Научно-издательский центр “Регулярная и хаотическая динамика”, 2007. 412 с.
 6. Махутов Н.А., Шишкин С.В. Безопасные соединения трубопроводов с эффектом памяти формы. М.: ИМАШ РАН, 1999. 504 с.