

СПЛАВЫ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ

(Прогрессивные технологии на основе материалов, обладающих эффектом памяти формы)

Н. Н. ПОПОВ



Попов Николай Николаевич. Область научных интересов: исследование физических, химических и механических свойств материалов; исследование свойств материалов с памятью формы и разработка прогрессивных технологий на их основе. Является руководителем ряда проектов международных и отечественных фондов. Автор и соавтор 3 монографий, 115 статей и докладов, изданных у нас в стране и за рубежом; соавтор десяти российских патентов на изобретения и трех свидетельств на полезные модели.

Некоторое время назад исследователи промышленно развитых стран стали активно применять термин «эффект памяти формы». Это направление, обозначавшееся аббревиатурой ЭПФ, получило в наши дни интенсивное развитие. И не случайно. Речь идет о весьма интересном явлении: деформированный объект, изготовленный из материала с ЭПФ, может восстановить свою первоначальную форму, если его температура будет соответствующим образом изменена.

В технической литературе на сегодня можно найти широкий перечень материалов, обладающих новым свойством. Среди них особое место принадлежит сплавам с памятью формы (СПФ) на основе титана, меди, золота и других элементов. Среди всех СПФ титано-никелевые сплавы обладают лучшим сочетанием термомеханических свойств, поэтому в настоящее время они наиболее применимы в мировой промышленности.

Свойство памяти формы реализуется в материалах, испытывающих фазовое термоупру-

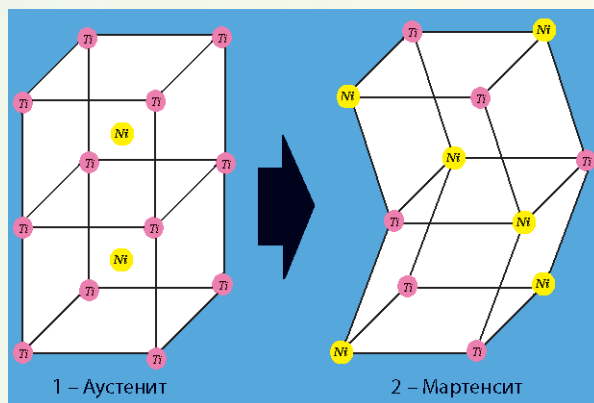


Рис. 1. Схема аустенитно-мартенситного превращения: 1 — аустенит; 2 — мартенсит

гое, т. е. обратимое, превращение мартенситного типа. Например, в сплавах никелида титана высокотемпературная аустенитная В2-фаза с упорядоченной кристаллической объемноцентрированной решеткой может «термоупруго» превращаться в низкотемпературную моноклинноискаженную орторомбическую мартенситную В19'-фазу (рис. 1).

Для проектирования конструкций из традиционных металлических материалов необходимо знать диаграммы «напряжение-деформация», которые имеют достаточно простой вид (рис. 2). Разгрузка металла на участке пластического деформирования, например, на траектории CD , вызывает устранение упругой деформации, а отрезок OD на оси деформации характеризует остаточную пластическую деформацию, которая обусловлена процессами скольжения дислокаций.

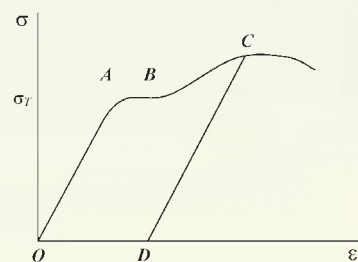


Рис. 2. Типичные диаграммы деформирования металлов

В отличие от обычных металлов, у материалов с памятью формы пластическое деформирование обусловлено мартенситно-двойниковым превра-

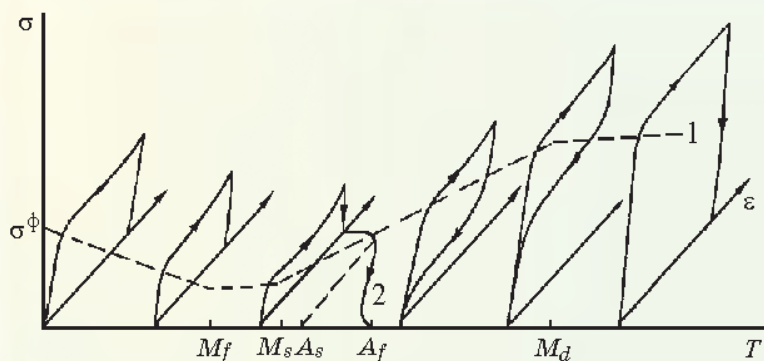


Рис. 3. Типичные диаграммы нагружения никелида титана в окрестности температур мартенситных превращений: 1 — критическое напряжение начала макроскопической неупругой деформации (σ^ϕ); 2 — возврат деформации; M_d — температура, выше которой дислокационный механизм более энергетически «выгоден», чем фазовый; M_s , M_f — температуры начала и окончания мартенситного, A_s , A_f — аустенитного превращения соответственно

пением (рис. 3). Поэтому заданную в интервале температур мартенситного превращения (M_s – M_f) деформацию после разгрузки можно восстановить при нагреве до температуры A_f аустенитного превращения.

Основные преимущества при использовании материалов с памятью формы в технических устройствах достигаются за счет их способности к прямому преобразованию тепловой энергии в механическую работу. При этом генерируются колоссальные напряжения, которые могут достигать 1000 МПа. Поэтому устройства, в которых применяются материалы с памятью формы, отличаются простотой и надежностью конструкции. Первым практическим использованием никелида титана стало применение его американской фирмой «Raychem Corp» для изготовления муфт, предназначенных для неразборного термомеханического соединения трубопроводов гидравлической системы самолетов F-14. В России в настоящее время такие материалы применяют в авиационно-космической, некоторых других отраслях промышленности и особенно в медицине.

Постановка задачи. В 1988 г. в технологическом отделении РФЯЦ-ВНИИЭФ началось развитие нового направления — разработка технологии задания формы и исследование работоспособности обратного клапана, изготовленного из никелида титана.

В начале 1989 г. к нам поступило предложение на разработку термомеханического соединения трубопроводов с использованием никелида титана. Позднее появились предложения об использовании СПФ в системах автоматики.

Автор был непосредственным исполнителем, а позднее стал руководителем работ по созданию технологий, основанных на использовании СПФ. В 1992 г. мною была сформулирована идея о новом способе управления термомеханическими характеристиками СПФ и об интенсификации процессов задания им формы. Необходимо было создать экспериментально-методическую базу для исследования термомеханических свойств материалов с эффектом памяти формы и разработать на их основе различные технологии.

Поставленные задачи были решены к 2003 г. Созданная база включает в себя устройства для задания формы в широком диапазоне температур и скоростей деформаций и различные методы определения термомеханических характеристик СПФ при проявлении ими эффекта памяти формы и эффекта обратимой памяти формы. Была выполнена разработка опытных конструкций и технологий, основанных на использовании никелида титана, исследована их работоспособность и выданы рекомендации по применению этих технологий в конструкциях.

Результаты и перспективы. Одна из возможных областей применения сплавов с памятью формы — это термомеханические соединения трубопроводов и цилиндрических элементов конструкций. На начальной стадии в качестве материала для изготовления муфт был выбран никелид титана марок ТН1 и ТН1К. Требовалось соединять трубопроводы из стали 12Х18Н10Т с наружным диаметром от 2 до 4 мм. При этом несущая способность должна была достигать значений нескольких тысяч атмосфер, что являлось достаточно сложной проблемой.

На первом этапе были произведены расчеты геометрических параметров муфт. На муфтах первого поколения проводились исследования для выбора материала. На муфтах второго поколения исследовали влияние толщины муфты и количества уплотняющих поясков, а на муфтах третьего поколения — влияние геометрии уплотняющих поясков на герметичность и несущую способность.

На первом этапе были произведены расчеты геометрических параметров муфт. На муфтах первого поколения проводились исследования для выбора материала. На муфтах второго поколения исследовали влияние толщины муфты и количества уплотняющих поясков, а на муфтах третьего поколения — влияние геометрии уплотняющих поясков на герметичность и несущую способность.

Как осуществлялось соединение трубопроводов термомеханическими муфтами? Одной из основных операций в технологии термомеханического соединения трубопроводов является дорнование (расширение) внутреннего диаметра муфт. Дорнование муфт макетов трубопроводов

первых партий производилось на испытательной машине с помощью специально разработанного приспособления при возвратно-поступательном движении дорна. После дорнования внутрь муфты вставляли концы соединяемых трубопроводов. Когда муфту нагревали, она, восстанавливая форму, сжималась и своими уплотняющими поясками внедрялась в тела соединяемых труб, образуя прочное и герметичное соединение.

При соединении трубопроводов с наружным диаметром 4 мм технология обеспечивает несущую способность ~ 300 МПа и работоспособность соединения при температурах от - 100 до + 300 °С, что значительно лучше существующих технологий.

Разработанная технология

- позволяет соединять трубы различной толщины и диаметра, а также трубы и цилиндрические детали из разных материалов, в том числе из тех, которые не подлежат сварке и пайке;
- требует значительно меньшего объема окружающего пространства для монтажа по сравнению с традиционными сварными и паяными соединениями;
- соединение обладает высокой вибрационной и коррозионной стойкостью, отличается простотой и быстротой сборки, отсутствием зон термического влияния и электрического воздействия;
- при осуществлении монтажа отсутствует открытое пламя, искрообразование, капли расплавленного металла;
- в отличие от процессов электросварки и пайки, где на качество полученного соединения значительно влияет квалификация работника, «человеческий фактор» практически отсутствует;
- прочность и коррозионная стойкость термомеханического соединения элементов конструкций находится на уровне прочности и коррозионной стойкости соединяемых материалов.

Соединение может быстро выполнять работник, имеющий невысокий уровень квалификации. Это особенно актуально в условиях дефицита квалифицированных специалистов и демографического спада в России. А в отличие от традиционной технологии сварки, которой сопутствуют грязные и грубые рукавицы, **наша технология — это технология тонких белых перчаток**. На рис. 4 представлен общий вид термомеханического соединения трубопроводов и элементов конструкций муфтами из никелида титана — сплава с эффектом памяти формы.

Однако метод классического дорнования имеет ряд недостатков: выделение тепловой энергии, ухудшение качества внутренней поверхно-



Рис. 4. Термомеханическое соединение трубопроводов муфтами из никелида титана



Рис. 5. Общий вид разрушенных после испытаний макетов термомеханического соединения трубопроводов муфтами из никелида титана

сти муфты. Он неприменим к муфтам, имеющим тонкие стенки и значительную длину. Для устранения этих недостатков нами разработан способ бесконтактного увеличения внутреннего диаметра муфт. Идея заключается в расширении муфты за счет импульса гидравлического давления хладагента (например, жидкого азота), залитого внутрь муфты. Для такого расширения муфт было разработано специальное устройство.

В целях проведения ремонтных или регламентных работ на трубопроводах выгодно иметь их разборное термомеханическое соединение. Оптимизацию геометрических параметров муфт термомеханических соединений на первом этапе разработки разборного соединения проводили применительно к неразборному соединению трубопроводов диаметром 12 мм. Были определены геометрические параметры, при которых удалось получить среднюю несущую способность муфт ~ 200 МПа при коэффициенте вариации 10 % (рис. 5). Полученные сведения использова-

лись при разработке разборных термомеханических соединений. При этом рассматривались различные варианты конструкций.

Было предложено использовать свойство воды: расширяться при снижении температуры ниже 4 °С и при этом отжимать муфту от элементов трубопроводов. Следующей была конструкция с использованием в качестве контртела упругой втулки. При проявлении памяти формы муфта обжимает втулку, изготовленную из сплава ТН1, и втулка, деформируясь, внедряется поясками в трубопроводы. Для разборки соединения его нагревают, при этом упругие силы втулки превышают реактивные усилия муфты и таким образом происходит разборка соединения.

Было обнаружено, что некоторые сплавы никелида титана марки ТН1К обладают эффектом обратимой памяти формы в большей степени, чем другие, и из них путем подбора нужного режима термообработки и соответствующей величины предварительной деформации можно изготовить муфты, позволяющие получать разборные термомеханические соединения трубопроводов. Так были изготовлены макеты, в которых отсутствовала промежуточная втулка, играющая роль контртела.

Разборку макетов производили путем охлаждения их от комнатной температуры до температуры жидкого азота (минус 196 °С). При охлаждении элементы трубопроводов легко вынимались из муфт, т. е. была также разработана опытная экологически чистая технология разборного соединения трубопроводов муфтами из никелида титана, позволяющая многократно осуществлять сборку-разборку. Эта технология может найти применение в различных отраслях техники для соединения трубопроводов и элементов конструкций.

Плюс керамика. В отличие от традиционных методов соединения пайкой металлических деталей с керамическими, когда используются дорогостоящие припои и сложное оборудование, технологи ВНИИЭФ разработали технологию соединения таких деталей с помощью муфты из сплава с памятью формы.

Для соединения цилиндрических металлических деталей с керамическими соединительную муфту, у которой внутренний диаметр меньше внешнего диаметра металлической трубы, предварительно деформируют в радиальном направлении для получения сборочного зазора. На керамическую деталь надевают прокладку, затем внутрь муфты вставляют концы соединяемых цилиндрических деталей. При нагреве муфта

сжимается до прежних размеров. При этом своими внутренними поясками она внедряется в металлическую трубу и прокладку. Поскольку керамическая труба тверже материала прокладки, она также внедряется (при наличии элементов шероховатости) в прокладку с обратной стороны, образуя герметичное соединение. Предлагаемый способ был использован для соединения трубы из нержавеющей стали 12Х18Н10Т (наружный диаметр 30 мм) с керамической трубой диаметром 28,95 мм.

В отличие от других методик такая технология является экологически чистой, менее дорогостоящей и позволяет выдерживать на порядок более высокое (до 5 МПа) избыточное давление в системе.

Перекрытая поток газа. В 1988 г. нам предложили использовать никелид титана для изготовления обратного клапана, но в начале 1990-х гг. эти работы были прекращены. Продолжить их удалось только в 1999 г. При срабатывании газового реактора горячий газ протекает через внутреннюю часть клапана и через зазор между седлом клапана и корпусом. При повышении температуры клапан «вспоминает» свою форму и отверстие перекрывается, препятствуя перетеканию газа обратно.

Для изготовления клапана первоначально был выбран никелид титана марки ТН1. Исследование показало, что при нагревании до температуры 130 °С клапан перекрывал зазор, а при охлаждении до температуры 37 °С газ вновь начинал течь. Поскольку температура 37 °С значительно выше нижнего предела температуры эксплуатации машин в России (– 50 °С), то, следовательно, указанный сплав ТН1 для применения в обратном клапане не подходит. Поэтому на втором этапе работы для изготовления клапана использовали сплав никелида титана, легированный ниобием. Новый материал имел более широкий температурный интервал фазовых превращений.

Применяя этот сплав, мы впервые получили результаты, подтверждающие возможность использования клапанов, изготовленных из сплава с памятью формы. Клапан из сплава на основе титан-никель-ниобий подтвердил работоспособность в интервале температур от – 60 до + 105 °С, что удовлетворяло всем требованиям эксплуатации. Испытания подтвердили работоспособность такого клапана в системе газопровода.

Против терактов и пожаров. В настоящее время мы постоянно слышим или читаем о различного рода террористических актах. Поэтому в 1999 г. во ВНИИЭФ была разработана кон-

структурная документация на термоэлектро-механический замок, исключающий несанкционированный доступ к внутреннему объему контейнеров с делящимися материалами.

В корпус замка соосно устанавливаются ось с крюком и резистор, служащий нагревателем пластины, выполненной из сплава с памятью формы. Находящаяся внутри резистора пластина деформирована путем кручения. Предполагается, что для санкционированного открывания замка на резистор будет подаваться электрическое напряжение, величина которого не может быть известна злоумышленнику. Резистор нагреет пластину, которая, принимая исходное недеформированное состояние, повернет ось с крюком на определенный угол. Нами был выбран соответствующий материал и разработана технология задания формы рабочему элементу замка.

При исследовании работоспособности замка было выявлено, что рабочий элемент при срабатывании от нагрева поворачивает запорный крюк на угол, достаточный для выведения его из зацепления со скобой. Результаты исследований показали соответствие температур и времени срабатывания рабочего элемента замка поставленным требованиям.

Для предотвращения негативных последствий в случае пожара в конструкциях машин и приборов используются размыкатели электрической цепи. Это может быть розетка, принцип работы которой основан на свойстве полиэтилена — значительно увеличивать свои размеры при нагревании. Такая розетка срабатывает при повышении температуры ее корпуса до 100–140 °С. Однако при разработке новых изделий возникла необходимость в конструкции размыкателя, имеющего пониженный температурный порог срабатывания, ~ 70–90 °С.

В 1994 г. было предложено использовать в конструкции размыкателя сплав никелида титана. На первом этапе при моем участии был выбран материал и разработана конструкция размыкателя. Предварительно сжатый рабочий элемент, изготовленный из СПФ, при последующем нагреве восстанавливает свою первоначальную форму, и при этом вилка и розетка разъединяются. По результатам исследований этих конструкций, изготовленных из сплава ТН1, установлено, что при темпах нагрева 20 град/мин начало восстановления формы элементов размыкателей, выполненных по типу розетки, находится в диапазоне 55–65 °С, а окончание — в диапазоне 70–90 °С. Время срабатывания размыкателей составляет от 155 до 200 с.

Поскольку изготовление рабочего элемента в виде сильфона является трудоемкой операцией, то на следующем этапе размыкатель изготавливали из набора сегментов. Исследование показало, что такой сегмент пригоден для использования в размыкателях, выполненных по типу розетки, поскольку величина восстановления формы у него достигает 5 мм.

Основными преимуществами элементов размыкателей, изготовленных из СПФ, являются:

- пониженный температурный порог срабатывания по сравнению с применяемым в настоящее время размыкателем;
- возможность многократного использования;
- уникальная возможность контроля температуры срабатывания при приемо-сдаточных испытаниях каждого изготовленного элемента до монтажа его в приборе.

В итоге во ВНИИЭФ была создана уникальная экспериментально-методическая база для исследования термомеханических свойств материалов с памятью формы в широком диапазоне температур и скоростей деформаций, позволившая исследовать свойства никелида титана — сплава с эффектом памяти формы — после различных температурно-скоростных воздействий. Результаты этих исследований имеют мировой уровень новизны. Это установлено по выводам из публикаций в ведущих отечественных и зарубежных изданиях и в ходе личных контактов со специалистами, признанными экспертами в данной области.

Нам удалось разработать технологии, основанные на применении СПФ и предназначенные для использования в конструкциях различных устройств с целью повышения их надежности. Новизна технических решений подтверждена получением патентов на изобретения и свидетельств на полезные модели.

Результаты исследований и разработанные технологии имеют важное хозяйственное значение и свидетельствуют о перспективности применения их как в атомной энергетике, так и других отраслях промышленности, на транспорте, в строительстве и особенно в медицине.

Автор выражает искреннюю благодарность Н. Н. Богуненко и Е. Б. Суворовой за помощь, оказанную при написании статьи.

ПОПОВ Николай Николаевич —
начальник лаборатории диагностики материалов
технологического отделения РФЯЦ-ВНИИЭФ,
доктор технических наук