

## Живой металл



**Ученые Института машиностроения, материалов и транспорта СПбПУ разрабатывают устройства на основе материала с памятью формы.**

Материал с памятью формы. Первое, что может прийти на ум неискушенному читателю при упоминании этого термина, – «жидкий» робот из «Терминатора», который менял свою форму за счет жидкометаллического сплава, из которого был создан. Не вдаваясь в сюжетные коллизии блокбастера, в этой статье расскажем, какие технологии из фантастических фильмов постепенно перетекают в реальность.

### **Когда у формы есть память**

Существует ряд материалов, металлических сплавов, которые при нагреве после предварительной деформации демонстрируют явление возврата к первоначальной форме. Материалы с эффектом памяти формы являются прототипами так называемых «интеллектуальных» материалов будущего. Помимо обычных, присущих традиционным материалам свойств (например, механических свойств металлов), «интеллектуальные» материалы обладают и функциональными свойствами. Одним из таких свойств является свойство сенсора, которое позволяет материалу реагировать на изменение окружающей среды.

Эффект памяти формы (ЭПФ) металлов – это физическое явление, при котором пластически деформированный металл восстанавливает свою первоначальную форму (которая у него была до деформации), как правило, при нагреве. Так, если стальную проволоку или пластину, изогнутую под прямым углом, пластически деформируя ее, выпрямить, то снова придать этой проволоке или пластине первоначальную форму (т.е. изогнутой под прямым углом конструкции) другим путем, кроме ее деформирования в обратном направлении, невозможно.

Эффект памяти формы задается проволоке или пластине, изготовленной из специального сплава при высокой температуре, т.е. согнутая под углом проволока или пластина нагревается и после ее охлаждения из высокотемпературного состояния, называемого аустенитным, получается охлажденное состояние металла, называемое мартенситным. Для металлических сплавов различие данных состояний заключается в различии кристаллических решеток, при этом оба состояния стабильны при соответствующих температурах. В мартенситном состоянии проволоку пластически деформируют (выпрямляют). Если проволоку нагреть (перевести в аустенитное состояние), то она «вспомнит» свое первоначальное состояние, которое у нее было при высокой температуре. При этом вся пластическая деформация исчезнет, и образец может совершить достаточную механическую работу (например, поднять груз или привести в действие выходное звено механического устройства).

Обширный класс материалов обладают эффектом памяти формы. Такой эффект характерен для сплавов Ti-Ni, Ti-Au, Ti-Pd, Ti-Pt, Au-

Cd, Cu-Zn и др. Одним из самых известных материалов с памятью формы является сплав никеля и титана – нитинол. Если закалить пружину из такого материала, а затем распрямить ее в холодном виде, то при нагреве она вновь свернется в пружину. Этот эффект связан с тем, что сплав состоит из вытянутых игольчатых зерен – мартенситов. После закалки зерна находятся в нормальном, ненапряженном состоянии. Деформация материала приводит к механическим напряжениям в зернах, которые при нагреве релаксируют, восстанавливая исходную форму.

Памятью формы могут обладать не только сплавы – хорошо известны полимерные материалы с такими свойствами. В отличие от сплавов, полимеры могут восстанавливать свою форму не только под действием тепла – известны материалы, в которых переход запускается с помощью света, электричества или химической реакции. Еще одним преимуществом полимеров перед сплавами является легкость в обработке – такие материалы можно печатать на 3D-принтерах.

### **От медицины до космоса**

Материалы с памятью формы применяются в самых разных областях. Как подушка «запоминает» форму головы, пока мы спим, так, например, и в медицине ортопедические имплантаты в ходе операции должны встать, как влитые. Необходимы такие материалы и промышленности, например при создании неразъемных соединений. Благодаря использованию материала с памятью формы можно соединить металлические конструкции, не используя сварку, и таким образом избежать появления сварного шва, а, следовательно, его недостатков, таких как разупрочнение металла и накопление дефектов в переходной зоне между металлом и сварным швом. Кроме того, материалы с памятью формы применяются, когда сварка из-за переплетения узлов или сложности металлических конструкций становится труднодоступной.

Сплавы с эффектом памяти формы используются в силовом оборудовании для создания малогабаритных приводов и устройств, способных развивать сравнительно большие усилия и моменты. В мартенситных преобразователях энергии (мартенситные приводы и мартенситные двигатели). Конструкции из таких материалов работают без внешних приводов, поэтому их часто используют в системах автоматического регулирования расхода тепла и температуры. Например, дефлектор, шторки которого меняют положение при изменении температуры – при повышении раскрываются, а с понижением закрываются. А еще в элементах робототехники и для изготовления самораскрывающихся антенн космических кораблей. Производители современной техники постоянно расширяют области применения таких сплавов. Так, например, компания «Дженерал моторс» получила 175 патентов на материалы с ЭПФ.

### **Разработки ИММиТ побеждают**

Разработками в этой перспективной области активно занимается Институт машиностроения, материалов и транспорта (ИММиТ) СПбПУ. Летом этого года в рамках Программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» в вузе впервые прошел конкурс Best International Grant for PhD (BIG PhD), организованный в целях поддержки лучших иностранных аспирантов и их научных руководителей. В конкурсе принимали участие аспиранты очной формы обучения, при оценке заявок учитывался научно-исследовательский потенциал и уровень проводимых исследований. Высокий балл заявке приносило трудоустройство иностранных аспирантов в лабораториях университета, участие в рабочих группах при реализации грантов, активное участие в конференциях и семинарах, различных социальных и молодежных проектах. Отбор на предоставление грантов проводила экспертная комиссия, которая после тщательной оценки всех заявок определила 10 команд-победителей, состоящих из иностранного аспиранта и его научного руководителя.

Впервые сплав с памятью формы (это был Ni-Ti-Fe) применен в американском самолете-истребителе F-14 в 1971 году. Втулка для соединения труб гидравлической системы военных самолетов изготавливается из сплава никелида титана. Ее функциональными элементами являются внутренние выступы. В истребителе более 300 тысяч таких соединений. Также никелид титана применяется для изготовления гидравлических машин, винтов судов, водяных турбин.

В медицине используется новый класс композиционных материалов «биокерамиканикелид титана». В таких композитах одна составляющая (никелид титана) обладает сверхэластичностью и памятью формы, а другая сохраняет свойства биокерамики. Также материалы с эффектом памяти формы применяются в медицине, например при изготовлении эндопротезов (внутренних устройств, замещающих функцию органа). Для восстановления проходимости кровеносного сосуда используются спиральные эндопротезы с памятью формы. Эндопротез в компактном виде вводится через пункционное отверстие в сосуд и по его руслу доставляется в место сужения сосуда. Здесь протез отсоединяется от доставляющего устройства, разворачивается под действием тепла тела до требуемого диаметра и армирует стенки сосуда, восстанавливая кровоток по артерии.

Освоение ближнего и дальнего космоса связано с созданием орбитальных станций и крупным космическим строительством. Необходимо сооружение таких громоздких объектов, как солнечные батареи и космические антенны. Антенны состоят из листа и стержня из сплава Ti-Ni, которые свернуты в виде спирали и помещены в углубление в искусственном спутнике. После запуска спутника и выведения его на орбиту антенна нагревается с помощью специального нагревателя или тепла солнечного излучения, в результате чего она выходит в космическое пространство.

Одним из проектов-победителей стала «Разработка технологического оснащения с зажимными электромеханическими устройствами на основе материала с памятью формы». Проект предложил аспирант ИММиТ Хазем Арслан, его научный руководитель – доктор технических наук, профессор Высшей школы машиностроения Михаил Тимофеевич Коротких. В 2022 году новая разработка была запатентована.

### **Мал золотник, да дорог**

Основой современной промышленности являются станки с ЧПУ (числовым программным управлением). Это высокотехнологичное оборудование, в котором исполнительные устройства (приводы) управляются автоматически. Но в настоящее время при автоматизации машиностроительных производств на основе использования станков с ЧПУ определенной проблемой является автоматизация установки, закрепление и снятие заготовок в станочных приспособлениях. По мнению ученых ИММиТ, силовые

приводы, работающие с пневматическими, гидравлическими и механическими системами, могут быть заменены устройством для закрепления заготовок из сплава с памятью формы благодаря его небольшому весу и высокой мощности. Кроме того, такая система содержит меньшее количество деталей и, как правило, проста в обслуживании и проверке.

В рамках проекта ученые разработали термомеханический силовой привод. Это изобретение относится к силовым зажимным элементам и может быть использовано в качестве элемента закрепления заготовок в станочной оснастке. Такая система позволяет производить управление закреплением и раскреплением заготовок дистанционно в условиях автоматизированного производства, также может быть использована в различных малогабаритных устройствах.

При нагреве предварительно пластически растянутых элементов из сплава с памятью формы до критической температуры они могут укорачиваться на длину, определяемую допустимой относительной пластической деформацией. При этом возникающие в этом ма-

териале напряжения могут достигать 800 МПа. В то же время при растяжении этого сплава при температуре ниже критической его предел прочности невелик и составляет не более 200 МПа.

«Существуют различные силовые приводы, содержащие элементы из сплавов с памятью формы. Такие устройства могут использоваться в качестве зажимного элемента, но для обеспечения работоспособности устройства требуется подача теплоносителя, что увеличивает его габариты и усложняет дистанционное управление. Нам же удалось создать компактный силовой привод, работа в котором поддерживается независимо от теплового воздействия на элементы из сплавов с памятью формы. Я очень рад, что комиссия поддержала наш проект.

Уверен, что наша научная группа сможет воплотить эти идеи в жизнь», – отмечает Хазем Арслан. Исследователям удалось добиться высокой скорости срабатывания привода при раскреплении заготовок. По мнению разработчиков, скорость срабатывания также может быть увеличена с помощью внешнего охлаждения и увеличения поверхности проволоки из материала с памятью формы. Раскрепление заготовок производится при быстром нагреве (менее 0,2 сек.) пропусканием импульса электрического тока через элемент из сплава с памятью формы, а закрепление происходит только при остывании элемента ниже критической температуры (ниже 70°C).

«Как показывают наши расчеты, габариты у данного устройства меньше, чем у пневматического привода, используемого в станочных приспособлениях, а сфера возможного применения значительно шире. Отсутствие шлангов для подачи сжатого воздуха значительно упрощает его размещение в различных приспособлениях, применяемых на станках с ЧПУ в условиях автоматизированного производства», – считает профессор Михаил Коротких