УДК 669.018.2

СПЛАВЫ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ: ТЕХНОЛОГИИ, ВЫЗОВЫ И БУДУЩЕЕ

♦♦♦♦♦

SHAPE MEMORY ALLOYS IN CONSTRUCTION: TECHNOLOGIES, CHALLENGES, AND FUTURE DIRECTIONS

Леонова Анна Николаевна
кандидат технических наук,
доцент кафедры строительных конструкций,
Кубанский государственный технологический университет
lan_kubstu@mail.ru

Кубрина Софья Александровна
студентка,
Кубанский государственный технологический университет
sofiakubrina2004@gmail.com

Аннотация. Рассмотрены современные технологии применения сплавов с эффектом памяти формы (ЭПФ) в строительстве, включая сейсмостойкие конструкции и мостовые сооружения. Описаны ключевые виды сплавов с ЭПФ, их механические свойства, такие как эффект памяти формы, сверхэластичность и коррозионная стойкость. Обозначены основные ограничения и перспективы развития технологии, включая потенциал сплавов с ЭПФ в создании адаптивных и устойчивых конструкций будущего.

Ключевые слова: сплавы с памятью формы, сверхэластичность, коррозионная стойкость, температурные деформации, никелид титана.

Leonova Anna Nikolaevna
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor of Building Structures,
Kuban State Technological University
lan_kubstu@mail.ru

Kubrina Sofya Alexandrovna
Student,
Kuban State Technological University
sofiakubrina2004@gmail.com

Annotation. Modern technologies for the use of shape memory alloys (SMA) in construction, including earthquake-resistant structures and bridge structures, are considered. The key types of SMA alloys and their mechanical properties, such as shape memory effect, superelasticity, and corrosion resistance, are described. The main limitations and prospects for the development of the technology are outlined, including the potential of SMA alloys in creating adaptive and sustainable structures of the future.

Keywords: shape memory alloys, superelasticity, corrosion resistance, temperature deformation, titanium nickelide.

В настоящее время приоритетным направлением является создание и внедрение новых конструкционных и функциональных материалов и технологий их производства, одним из которых является разработка «умных» материалов, в том числе с эффектом памяти формы (ЭПФ).

Материалы с эффектом памяти формы (ЭПФ) обладают способностью восстанавливать свою первоначальную форму после значительной и предположительно необратимой деформации при воздействии определённого стимула. При определённых условиях в сплавах часто наблюдается сверхэластичность и вязкоупругость в полимерах. Уникальные свойства этих материалов позволяют применять их в разных сферах: медицине, аэрокосмических технологиях и строительстве [1].

Широко используемыми на данный момент материалами с эффектом памяти формы являются сплавы металлов, которые также называют сплавы с ЭПФ: никелево-титановый сплав нитинол (TiNi – никелид титана); сплавы меди, цинка и алюминия (Cu-Al-Zn); меди, алюминия и никеля (Cu-Al-Ni); железа, марганца и кремния (Fe-Mn-Si).

Самым востребованным сплавом с ЭПФ является никелево-титановый сплав благодаря его коррозионной стойкости, высокой усталостной прочности (до 10^7 циклов) и биосовместимости. Температура фазового перехода находится в диапазоне от –50 °C до 100 °C в зависимости от состава, что делает его пригодным для медицинских и инженерных применений. Например, медицинские стенты активируются при температуре тела (~37 °C), а инженерные демпферы – в диапазоне от 80 °C до 100 °C. К недостаткам относят высокую стоимость, сложность обработки и чувствительность к примесям [2].

Медно-алюминиевые сплавы значительно дешевле никелево-титанового сплава. Однако их применение ограничено использованием в некритичном промышленном

оборудовании, при котором долговечность не является обязательным критерием, из-за хрупкости и высоких температур фазового перехода в диапазоне 80–200 °C.

Железные сплавы с эффектом памяти формы имеют ограниченную деформацию для восстановления формы (до 4 %). Их ключевое применение – строительство, где важными факторами являются доступность и совместимость со сталью и бетоном [3].

Восстановление первоначальной формы при повышении температуры происходит за счёт изменения внутренней структуры материала. При низкой температуре эти материалы имеют пластинчатую и волокнистую структуру, которая легко допускает деформации, поскольку некоторые пластины могут перемещаться относительно других; это называется мартенситным состоянием. При нагревании материал приобретает более жёсткую кубическую структуру, которая больше не допускает перемещения материала и, следовательно, деформаций. Это называется аустенитным состоянием. Этот переход от слоистой структуры к кубической обладает способностью возвращать материалу его первоначальную форму и устранять все деформации. При повторном снижении температуры материал снова принимает слоистую форму и может быть деформирован повторно. Этот процесс характерен для атомного строения материала, а значит, его можно повторять неограниченное количество раз, не влияя на его поведение и тем самым избегая, например, механических поломок из-за износа или усталости деталей оборудования. Например, после землетрясения, нагрев в сейсмических демпферах активирует восстановление формы, устраняя деформации [4].

Некоторые сплавы с эффектом памяти формы обладают свойством сверхэластичности. Это свойство материала, нагруженного напряжением, которое превышает его предел текучести, для полного восстановления его начальной формы после снятия нагрузки. Данное состояние может быть достигнуто из-за эластичных характеристик фазы аустенита, которые позволяют материалу подстраиваться под значительные нагрузки и затем возвращаться к исходному состоянию после снятия нагрузки. На данный момент времени самым изученным материалом с точки зрения памяти формы является никелево-титановый сплав [5].

Долговечность сплавов с ЭПФ – это их способность сохранять функциональные свойства даже после многолетней эксплуатации в условиях циклических нагрузок, агрессивных сред и экстремальных температур. В строительстве, демпферы, установленные в мостах или высотных зданиях, годами компенсируют вибрации и сейсмические толчки, постепенно возвращаясь к исходной конфигурации после каждой нагрузки. Ключевым фактором долговечности является коррозионная стойкость. Никелево-титановый сплав образует на поверхности тонкий оксидный слой TiO_2, который защищает материал от разрушения в соленой воде, кислотных дождях или промышленных выбросах. Это делает его идеальным для морских платформ и химических реакторов. Однако другие сплавы с эффектом памяти формы, такие как железные или медно-алюминиевые, требуют дополнительной защиты в виде нанесения полимерных покрытий или легирования хромом и молибденом, чтобы избежать окисления и преждевременного старения.

Сплавы с эффектом памяти формы активно внедряются в строительную отрасль благодаря уникальным свойствам – сверхэластичности и коррозионной стойкости. Их применяют при возведении сейсмостойких конструкций, мостовых сооружений и инновационных архитектурных решений.

В России использование железных сплавов с ЭПФ в строительстве находится на стадии активных исследований и пилотных проектов, направленных на повышение сейсмостойкости, долговечности и адаптивности конструкций. Например, арматура из железных сплавов при нагреве электрическим током создает сжимающие напряжения в бетоне, что повышает его прочность и устойчивость к трещинообразованию. Такая технология исключает необходимость гидравлических домкратов, сокращая время и стоимость работ [3]. В России подобные решения тестируются в проектах реконструкции мостов, таких как Крымский мост, где арматура из сплавов с ЭПФ помогает компенсировать нагрузки от транспорта и температурных перепадов.

Несмотря на перспективность, сплавы с ЭПФ сталкиваются с рядом ограничений. Помимо высокой стоимости никелево-титанового сплава и коррозионной уязвимости железных сплавов, ключевой проблемой остается ограниченный диапазон рабочих температур. Например, железные сплавы с ЭПФ теряют функциональность при температурах выше 150 °C из-за необратимого распада мартенситной фазы. Еще одним вызовом является сложность обработки: сплавы с ЭПФ требуют специализированных методов сварки и механической обработки из-за склонности к образованию трещин и деформационному упрочнению. Например, при шлифовке никелево-титанового сплава выделяется токсичная пыль, требующая дорогостоящих систем фильтрации. Ещё одним ограничением является чувствительность к примесям. Даже 0.1 % примесей кислорода или углерода в никелево-титановом сплаве нарушают температурные параметры фазового перехода, а в железных сплавах с ЭПФ следы серы провоцируют межкристаллитную коррозию.

Перспективы развития сплавов с ЭПФ связаны с преодолением этих барьеров. Наноструктурирование и легирование (например, добавление меди в никелево-титановый сплав) позволяют повысить прочность. Технологии 3D-печати открывают возможности для создания сложных конструкций с применением ЭПФ с заданной пористостью, что актуально для теплообменников и акустических панелей. Внедрение IoT-датчиков в сочетании с демпферами из сплавов с ЭПФ позволит реализовать системы реального времени для мониторинга напряжений в мостах и зданиях. В России перспективны проекты по адаптации сплавов с ЭПФ для Арктики, где материалы должны сохранять функциональность при экстремально низких температурах. Таким образом, сплавы с эффектом памяти формы, преодолевая текущие ограничения, становятся ключевым элементом «умных» городов будущего, где конструкции не просто устойчивы, но и способны адаптироваться к вызовам среды.

Литература

1. Shape memory materials / W.M. Huang [et al.] // Materials Today. – 2010. – № 13. – P. 54–61.
2. Ковтунов А.И. Технология формирования и структура сплавов на основе никелида титана при двухдуговой плавке / А.И. Ковтунов, Д.И. Плахотный // Цветные металлы. – 2021. – № 7. – С. 64–70.
3. Салатов Е.К. Усиление строительных конструкций материалами с эффектом памяти формы // Вестник МАСИ. – 2022. – № 3. – С. 5–9.
4. Саенков К.Л. Теории аустенитно-мартенситных превращений / К.Л. Саенков, С.А. Оглезнева, Л.М. Гревнов // Фундаментальные исследования. – 2017. – № 12 (часть 1). – С. 121–125.
5. Насирова Н.Н. Изучение и использование материалов с эффектом памяти формы / Н.Н. Насирова, С.А. Арефьева // Модернизация, инновации, прогресс: передовые технологии в материаловедении, машиностроении и автоматизации – MIP: ENGINEERING-IV-2022. Сборник научных статей по материалам IV Международной научной конференции. – Красноярск, 2022. – С. 18–22.

References

1. Shape memory materials / W.M. Huang [et al.] // Materials Today. – 2010. – № 13. – P. 54–61.
2. Kovtunov A.I. Technology of formation and structure of titanium nickelide-based alloys in double-arc melting / A.I. Kovtunov, D.I. Plakhotny // Non-ferrous metals. – 2021. – № 7. – P. 64–70.
3. Salatov E.K. Reinforcement of building structures with materials with shape memory effect // Bulletin of MASI, 2022. – № 3. – P. 5–9.
4. Saenkov K.L. Theories of austenitic-martensitic transformations / K.L. Saenkov, S.A. Oglezneva, L.M. Grevnov // Fundamental research. – 2017. – № 12 (Part 1). – P. 121–125.
5. Nasirova N.N. Study and use of materials with shape memory effect / N.N. Nasirova, S.A. Arefieva // Modernization, innovation, progress: advanced technologies in materials science, mechanical engineering and automation - MIP: ENGINEERING-IV-2022. Collection of scientific articles based on the materials of the IV International Scientific Conference. – Krasnoyarsk, 2022. – P. 18–22.