

## Металлургия, технологии новых материалов

DOI: <https://doi.org/10.53002/090>

### DEVELOPMENT OF NEW SHAPE MEMORY ALLOYS FOR THE AVIATION INDUSTRY

*Dalimaeva Ya.S.*

Vitebsk State Technological University, Vitebsk, Belarus  
\*Corresponding author email: [sharyana11390@gmail.com](mailto:sharyana11390@gmail.com)

#### Author information:

**Dalimaeva Yanina Sergeevna**, Vitebsk State Technological University, Vitebsk, Belarus, e-mail: [sharyana11390@gmail.com](mailto:sharyana11390@gmail.com)

**Abstract** — This article discusses new shape memory alloys (SMA) designed for the aviation industry. The main characteristics of such materials, their advantages and possible applications in aviation are given. The methods of developing new alloys, including the use of modern computational methods and experimental approaches, are described. The results of a study of the properties of new alloys are presented, and the prospects for their introduction into the design of modern aircraft are discussed.

**Keywords** — shape memory alloys, aviation industry, memory effect materials, smart materials, structural materials, deformation memory, aviation technologists.

### АВИАЦИЯ ӨНЕРКӘСІБІ ҮШІН ЖАҢА ЖАД ФОРМАСЫ ҚОРЫТПАЛАРЫН ӘЗІРЛЕУ

*Далимаева Я.С.*

Витебск мемлекеттік технологиялық университеті, Витебск қ., Беларусь  
\*Корреспондент автор e-mail: [sharyana11390@gmail.com](mailto:sharyana11390@gmail.com)

#### Авторлар туралы ақпарат:

**Далимаева Янина Сергеевна**, Витебск мемлекеттік технологиялық университеті, Витебск қ., Беларусь, e-mail: [sharyana11390@gmail.com](mailto:sharyana11390@gmail.com)

**Аңдатпа** — Бұл мақалада авиация өнеркәсібіне арналған жаңа пішінді жад қорытпалары (SMA) қарастырылады. Мұндай материалдардың негізгі сипаттамалары, олардың артықшылықтары және авиацияда қолданылуы мүмкін. Жаңа қорытпаларды әзірлеу әдістері, соның ішінде заманауи есептеу әдістері мен эксперименттік тәсілдерді қолдану сипатталған. Жаңа қорытпалардың қасиеттерін зерттеу нәтижелері ұсынылған, сондай-ақ оларды заманауи әуе кемелерінің дизайнына енгізу перспективалары талқыланады.

**Түйін сөздер** — пішін жады қорытпалары, авиация өнеркәсібі, жад эффектісі материалдары, ақылды материалдар, құрылымдық материалдар, деформациялық жады, авиациялық технологтар.

### РАЗРАБОТКА НОВЫХ СПЛАВОВ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ ДЛЯ АВИАЦИОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

*Далимаева Я.С.*

Витебский государственный технологический университет, г. Витебск, Беларусь  
\*Корреспондент автор e-mail: [sharyana11390@gmail.com](mailto:sharyana11390@gmail.com)

#### Информация об авторах:

**Далимаева Янина Сергеевна**, Витебский государственный технологический университет, г. Витебск, Беларусь, e-mail: [sharyana11390@gmail.com](mailto:sharyana11390@gmail.com)

**Аннотация** — В данной статье рассматриваются новые сплавы с памятью формы (SMA), предназначенные для авиационной промышленности. Приведены основные характеристики таких материалов, их преимущества и возможные области применения в авиации. Описаны методики разработки новых сплавов, включая использование современных вычислительных методов и экспериментальных подходов. Представлены результаты исследования свойств новых сплавов, а также обсуждаются перспективы их внедрения в конструкцию современных воздушных судов.

**Ключевые слова** — сплавы с памятью формы, авиационная промышленность, материалы с эффектом памяти, умные материалы, конструкционные материалы, деформационная память, авиационные технологии.

## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В работе выполнен анализ современных направлений разработки сплавов с памятью формы для авиационной промышленности. Рассмотрены основные системы сплавов (NiTi, CuAlNi, Fe-SMA и высокоэнтропийные SMA), методы регулирования их функциональных свойств посредством легирования, термической обработки, интенсивной пластической деформации и аддитивных технологий. Проведен сравнительный анализ влияния химического состава и технологий изготовления на эффект памяти формы, сверхупругость, циклическую долговечность и диапазон рабочих температур. Показано, что современные подходы к разработке SMA позволяют повысить надежность и ресурс авиационных конструкций, снизить их массу и обеспечить создание интеллектуальных адаптивных систем.

## ВВЕДЕНИЕ

Авиационная промышленность постоянно требует улучшения эксплуатационных характеристик материалов, используемых в конструкции воздушных судов [1]. Сплавы с памятью формы (Shape Memory Alloys, SMA) представляют собой инновационные материалы, способные изменять свою форму при изменении температуры или под действием механической нагрузки и возвращаться в первоначальное состояние после снятия внешнего воздействия. Их применение в авиации открывает новые возможности для повышения эффективности и безопасности полетов, позволяя разрабатывать адаптивные конструкции и системы управления [2].

Одним из наиболее известных и широко используемых сплавов с памятью формы является сплав на основе никеля и титана (NiTi, также известный как нитинол). Он характеризуется высокой коррозионной стойкостью, значительными деформациями восстановления и относительно стабильными рабочими температурами, что делает его перспективным для применения в авиации и аэрокосмической технике. Кроме нитинола, активно исследуются сплавы на основе меди (Cu-Al-Ni, Cu-Zn-Al) и

железа (Fe-Mn-Si), которые могут найти применение в тех случаях, где необходимы более низкая стоимость или иные эксплуатационные свойства [3,4].

**Пробел в исследованиях.** Несмотря на значительный прогресс в разработке сплавов с памятью формы, большинство исследований посвящено традиционным сплавам NiTi и их применению в медицине и общем машиностроении. Недостаточно изучены вопросы создания новых авиационных SMA с расширенным диапазоном рабочих температур, повышенной усталостной долговечностью и стабильностью функциональных свойств при длительном циклическом нагружении. Кроме того, ограниченное число исследований посвящено использованию высокоэнтропийных сплавов с памятью формы, аддитивных технологий и современных методов компьютерного моделирования для проектирования материалов нового поколения. Отсутствует комплексный анализ перспектив применения этих разработок в авиационных интеллектуальных конструкциях.

**Научная новизна.** Научная новизна работы заключается в комплексном анализе современных направлений развития сплавов с памятью формы для авиационной промышленности с учетом публикаций последних лет. Выполнено сравнение традиционных и перспективных систем SMA, включая высокоэнтропийные и аддитивно изготовленные материалы. Обобщены современные подходы к управлению эффектом памяти формы, сверхупругостью, механическими свойствами и циклической долговечностью посредством оптимизации химического состава и технологий обработки. На основании проведенного анализа определены наиболее перспективные направления дальнейших исследований, связанные с созданием высокотемпературных и высокоресурсных SMA для интеллектуальных авиационных конструкций.

## МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Для разработки новых сплавов с памятью формы применяются различные подходы,

начиная с теоретического моделирования, основанного на методах квантовой механики и молекулярной динамики, которые позволяют прогнозировать свойства будущих составов и определять оптимальный химический состав и фазовый переход, необходимый для заданных рабочих температур. На следующем этапе проводится экспериментальный синтез пробных образцов, включающий разнообразные легирующие элементы, такие как никель-титан, медь-алюминий-никель и железо-марганец-кремний, с целью найти баланс между механическими и функциональными свойствами. Затем эти образцы подвергаются испытаниям на деформацию, усталостную долговечность и термочувствительность, что даёт возможность определить циклическую стабильность и эффективность восстановления формы. Наконец, детальный анализ структуры с помощью рентгеноструктурного анализа и микроскопических методов позволяет выявить особенности фазовых превращений, механизмы деформации и связь между полученной структурой и эксплуатационными характеристиками, что служит основой для дальнейшей оптимизации состава и методов обработки.

Методы разработки новых сплавов с памятью формы [5]:

1. Оптимизация химического состава. Подбор соответствующих легирующих элементов (например, добавление меди, ниобия, цинка или алюминия) позволяет регулировать температуру начала и конца мартенситного превращения (As, Af, Ms, Mf), что определяет диапазон рабочих температур SMA.

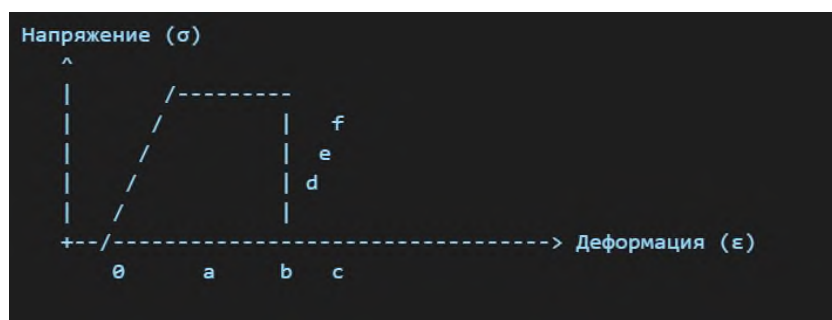
2. Термическая обработка. Закалка и старение при определенных температурах обеспечивают формирование необходимых фазовых соотношений, влияющих на характер и стабильность мартенситного превращения. Контроль режимов закалки и отпуска позволяет повысить прочность, пластичность и циклическую стойкость сплавов.

3. Интенсивная пластическая деформация. Применение методов вроде горячей прокатки, прессования или равноканального уголкового прессования (ECAP) способствует получению ультрамелкозернистой структуры, что может улучшить механические свойства, скорость отклика и стабильность обратимых деформаций.

4. Комбинирование материалов и создание композиционных SMA. Разработка многослойных или композитных систем, включающих SMA и другие высокопрочные или тугоплавкие сплавы, помогает добиться сочетания уникальных функциональных свойств с повышенной износостойкостью, коррозионной стойкостью и жаропрочностью.

**Таблица 1** – Химический состав исследованных сплавов

| Обозначение сплава | Ni (wt.%) | Ti (wt.%) | Cu (wt.%) | Al (wt.%) | Fe (wt.%) | Примечания                               |
|--------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------------------------------------|
| SMA-1              | 55.0      | 45.0      | –         | –         | –         | Классический NiTi сплав                  |
| SMA-2              | 53.5      | 45.0      | 1.5       | –         | –         | Модифицированный NiTi                    |
| SMA-3              | –         | –         | 14.0      | 4.5       | 81.5      | CuAlNiFe-сплав                           |
| SMA-4              | –         | –         | –         | –         | –         | (Пример для добавления других элементов) |



**Рисунок 1** – Напряжение - деформация (Stress-Strain) при разных температурах

Характеристики и преимущества сплавов с памятью формы:

1. Способность к обратимой деформации. SMA могут восстанавливать значительные деформации (до 8-10% и более) после термоциклирования или снятия нагрузки, что делает их эффективными в качестве актуаторов и элементов виброзащиты.

2. Высокая удельная прочность. Некоторые SMA обладают лучшим соотношением прочности к массе, чем традиционные металлы, что особенно актуально для авиационных конструкций.

3. Коррозионная стойкость. Многие сплавы (особенно на основе NiTi) незначительно подвержены коррозии, сохраняя рабочие характеристики в агрессивных средах.

4. Функциональная стабильность. При правильном выборе химического состава и оптимальных режимах термообработки SMA сохраняют свои свойства в широком диапазоне циклов нагружения, что важно для длительной эксплуатации на борту воздушных судов.

1) a–b: упругий участок

2) b–c: переход к пластической деформации

3) d–e–f: восстановление формы при нагреве

Кривые дают представление о том, при каком напряжении начинает происходить смещение мартенситных пластин и какая остаточная деформация возникает после разгрузки. При разных температурах будет наблюдаться различная форма графика.

Перспективы внедрения и области применения:

1. Адаптивные аэродинамические поверхности. Использование SMA-актуаторов для изменения формы крыла или закрылков самолета во время полета открывает возможности для оптимизации аэродинамики и снижения расхода топлива.

2. Системы виброзащиты и демпфирования. Сплавы с памятью формы могут использоваться для уменьшения вибраций в движущихся узлах и механизмах, повышая комфорт и срок службы оборудования.

3. Антиобледенительные системы. SMA могут менять форму и генерировать тепло при прохождении фазы обратного превращения, что потенциально позволяет эффективно бороться с образованием льда на критических элементах воздушного судна.

4. Ремонт и самоисцеление конструкций. Благодаря свойству обратимого деформирования SMA способны частично восстанавливать свою форму при возникновении деформаций и трещин, снижая риск катастрофических разрушений.

Таким образом, сплавы с памятью формы представляют собой инновационное направление в области материаловедения и авиастроения, обладающее огромным потенциалом для улучшения ключевых показателей эффективности и безопасности воздушных судов. Дальнейшие исследования будут сосредоточены на расширении температурного диапазона работы, повышении циклической долговечности и устойчивости к экстремальным условиям эксплуатации, а также на интеграции SMA в интеллектуальные системы управления, что позволит создавать еще более совершенные авиационные конструкции.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Разработанные сплавы показали улучшенные механические свойства по сравнению с традиционными SMA, что открывает более широкие перспективы для их использования в авиационной отрасли. Повышенная устойчивость к циклическим нагрузкам обеспечивает длительный ресурс эксплуатации конструктивных элементов, а расширенный диапазон рабочих температур делает возможным их применение даже в экстремальных условиях полета.

Оптимизированные характеристики памяти формы гарантируют точное восстановление геометрии деталей, что напрямую влияет на безопасность и эффективность работы самолетных систем. Включение таких сплавов в конструкцию воздушных судов позволяет снизить массу, повысить топливную эффективность и улучшить аэродинамические свойства, способствуя развитию более совершенных и экономичных летательных аппаратов [6].

## ВЫВОДЫ

Разработка новых сплавов с памятью формы для авиационной промышленности является перспективным направлением в области материаловедения. Улучшенные характеристики таких материалов открывают широкие возможности для их применения в различных авиационных системах, от адаптивных аэродинамических поверхностей до активных демпфирующих конструкций, позволяя повысить безопасность и эффективность полетов.

Важной задачей дальнейших исследований остается оптимизация состава сплавов с учетом требуемых рабочих температур, механических нагрузок и условий эксплуатации. В этом направлении активно применяются как классические металлургические подходы (легирование, термическая и механическая

обработка), так и современные компьютерные методы моделирования, позволяющие прогнозировать фазовые переходы и механические свойства SMA на атомарном уровне.

Кроме того, совершенствование технологий производства, включая аддитивные методы и различные виды интенсивной пластической деформации, поможет добиться более равномерного распределения легирующих элементов и улучшенной микроструктуры. Это, в свою очередь, обеспечит высокую циклическую стойкость и точность восстановления формы в длительных эксплуатационных циклах.

Интеграция сплавов с памятью формы в авиастроении уже ведется в рамках исследований по созданию умных конструкций, способных реагировать на изменения условий полета в реальном времени. Дальнейшее развитие этого направления, включая расширение ресурсных испытаний, разработку стандартов и методов контроля качества, позволит создавать более экономичные и надежные авиационные системы, повышая конкурентоспособность отрасли и открывая новые горизонты для инновационных инженерных решений.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что в ходе выполнения данного исследования и публикации статьи нет конфликта интересов.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено без привлечения внешнего финансирования.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает глубокую признательность редактору и рецензенту журнала за внимательное рассмотрение рукописи, ценные замечания и рекомендации, которые позволили существенно улучшить содержание и качество статьи.

**Авторское право © 2025 принадлежит автору(ам).** Данная статья распространяется на условиях открытого доступа в соответствии с лицензией Creative Commons Attribution–ShareAlike 4.0 International (CC BY-SA 4.0). Лицензия разрешает свободное использование, распространение и воспроизведение в любой форме при условии обязательного указания авторства и сохранения той же лицензии для производных материалов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Rajput, G.S.; Vora, J.; Prajapati, P.; Chaudhari, R. “Areas of Recent Developments for Shape Memory Alloy: A Review.” *Materials Today: Proceedings*. 2022, 62(13), 7194–7198. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.407>
- [2] Mohammadgholipour, A.; Billah, A.H.M. “Mechanical Properties and Constitutive Models of Shape Memory Alloy for Structural Engineering: A Review.” *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2023, 34(20), 2335–2359. <https://doi.org/10.1177/1045389X231185458>
- [3] Li, Y.; Zhang, H.; Wang, X.; et al. “Development of High-Entropy Shape-Memory Alloys: A Review.” *Metals*. 2023, 13(7), 1279. <https://doi.org/10.3390/met13071279>
- [4] Yang, Y.-X.; Gao, W.-H.; Sun, B.; Fu, Y.-D.; Meng, X.-L. “Recent Advances on Additive Manufactured Shape Memory Alloys.” *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2024, 34(7), 2045–2073. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(24\)66525-8](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(24)66525-8)
- [5] Mañosa, L.; Planes, A. “Elastocaloric Effect in Shape-Memory Alloys.” *Shape Memory and Superelasticity*. 2024, 10, 89–98. <https://doi.org/10.1007/s40830-024-00477-x>
- [6] De Simone, A.; Cardone, D.; “Palermo, M.; et al. Shape Memory Alloys for Self-Centering Seismic Applications: A Review on Recent Advancements.” *Machines*. 2024, 12(9), 628. <https://doi.org/10.3390/machines12090628>

## REFERENCES

- [1] Rajput, G.S.; Vora, J.; Prajapati, P.; Chaudhari, R. “Areas of Recent Developments for Shape Memory Alloy: A Review.” *Materials Today: Proceedings*. 2022, 62(13), 7194–7198. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.407>
- [2] Mohammadgholipour, A.; Billah, A.H.M. “Mechanical Properties and Constitutive Models of Shape Memory Alloy for Structural Engineering: A Review.” *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2023, 34(20), 2335–2359. <https://doi.org/10.1177/1045389X231185458>
- [3] Li, Y.; Zhang, H.; Wang, X.; et al. “Development of High-Entropy Shape-Memory Alloys: A Review.” *Metals*. 2023, 13(7), 1279. <https://doi.org/10.3390/met13071279>

- 
- [4] Yang, Y.-X.; Gao, W.-H.; Sun, B.; Fu, Y.-D.; Meng, X.-L. “Recent Advances on Additive Manufactured Shape Memory Alloys.” *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2024, 34(7), 2045–2073. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(24\)66525-8](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(24)66525-8)
- [5] Mañosa, L.; Planes, A. “Elastocaloric Effect in Shape-Memory Alloys.” *Shape Memory and Superelasticity*. 2024, 10, 89–98. <https://doi.org/10.1007/s40830-024-00477-x>
- [6] De Simone, A.; Cardone, D.; “Palermo, M.; et al. Shape Memory Alloys for Self-Centering Seismic Applications: A Review on Recent Advancements.” *Machines*. 2024, 12(9), 628. <https://doi.org/10.3390/machines12090628>