

Аннотация цикла работ «Сплавы с эффектом памяти формы как материалы для линейных приводов»

Цикл работ основан на результатах научно-исследовательской работы А.В. Сибирева и соавторов за последние 5 лет и является частично продолжением диссертационного исследования А.В. Сибирева, выполнявшегося с 2011 по 2014 гг на тему “Необратимая деформация при многократной реализации эффекта памяти формы в сплаве TiNi”. Работы внесли значительный вклад в механику функциональных материалов и физическое материалаоведение. При этом А.В. Сибирев выполнил основную часть экспериментальных работ, выполнил обработку полученных данных и провёл анализ результатов. Цикл отличается актуальностью в постановке решаемых задач, а также оригинальностью разработанных методов и подходов.

Сплавы с эффектом памяти формы (СЭПФ) обладают уникальной способностью восстанавливать неупругую деформацию при нагреве. Благодаря этому они нашли широкое применение в аэрокосмической отрасли, медицине и других отраслях промышленности. Чаще всего СЭПФ применяются в качестве материала рабочего тела линейных приводов, мартенситных двигателей, рекуператоров тепловой энергии или других устройств многократного действия преобразующих тепловую энергию в механическую работу. В частности перспективность применения сплавов с памятью формы для создания рекуператоров тепловой энергии подчёркивается интересом крупных международных корпораций, так созданием рекуператоров тепла на основе СЭПФ занимается концерн General Motors (<https://www.fastcompany.com/1538926/gms-working-humanoid-robots-and-shape-memory-alloy-generators>).

Однако, не смотря на свои достоинства все устройства на основе СЭПФ обладают значительным недостатком – нестабильностью свойств при многократном термоциклировании. Поэтому для создания высокоэффективных устройств многократного действия из сплавов с памятью формы необходимо разрабатывать научно-обоснованные способы подавления нестабильности при сохранении высоких значений обратимой деформации и работоспособности. Данным вопросом Сибирев А.В. занимался с момента поступления в аспирантуру с 2011 года, и в рамках диссертационной работы показал, что одним из эффективных методов повышения стабильности свойств СЭПФ это модификация рабочего цикла устройства, таким образом, чтобы рабочее тело из СЭПФ испытывало неполные мартенситные превращения. В 2014 году были опубликованы 2 работы по этим результатам. После защиты диссертации Сибирев А.В. продолжил работу в СПбГУ. Ещё в рамках диссертационного исследования было установлено, что большую роль в изменение свойств во время термоциклирования СЭПФ играют процессы разупрочнения, протекающие во время обратного мартенситного превращения. Экспериментальные исследования особенностей протекания процессов разупрочнения в сплаве TiNi были опубликованы в 2016 году. В дальнейшем было высказано предположение о зависимости интенсивности процессов разупрочнения от температуры. Поэтому в течение следующего года было исследовано влияние промежуточных изотермических выдержек на изменение свойств сплава TiNi. В это же время на основе

структурно-аналитической теории, развиваемой в лаборатории Прочности материалов, был разработан программный модуль расчёта механического поведения СЭПФ с учётом термоактивируемого разупрочнения.

В рамках сотрудничества с ФТИ им. А.Ф. Иоффе было проведено исследование свойств сплава NiFeGa, который имеет весомые предпосылки потеснить сплав TiNi на рынке линейных приводов. Были изготовлены и исследованы монокристаллы сплава Ni₅₅Fe₁₈Ga₂₇. При испытаниях на растяжения монокристаллы показали высокие значения обратимой деформации при незначительных значениях накопленной необратимой деформации. Развивая международное сотрудничество между СПбГУ и ИТА НАН Беларуси, в 2018 году провели исследования реализации эффектов памяти формы в биметаллических пластинах с помощью кратковременных ультразвуковых импульсов. В рамках работы показана возможность реализации эффекта памяти формы с помощью ультразвукового генератора без использования традиционного нагрева, что значительно расширяет область применения устройств на основе СЭПФ. В том же году проведено исследование по влиянию низкотемпературных выдержек на свойства сплава TiNi.

The series of works is based on the results of the research work of A.V. Sibirev and co-authors over the last 5 years and is partly a continuation of the A.V. Sibirev dissertation research, carried out from 2011 to 2014 on the topic “Irreversible strain during repeated realization of the shape memory effect in the TiNi alloy”. The work made a significant contribution to the mechanics of functional materials and physical material science. A.V. Sibirev completed the bulk of the experimental work, performed the processing of the obtained data, and conducted an analysis of the results. The series is of relevance in the formulation of the tasks, as well as the originality of the developed methods and approaches.

Shape memory alloys (SMAs) have the unique ability to recover inelastic deformation upon heating. Thanks to this, they are widely used in the aerospace industry, medicine and other industries. Most often, SMAs are used as the material of working body of linear drives, martensitic drives, heat energy recuperators, or other multiple-action devices that convert thermal energy into mechanical work. In particular, the prospect of using shape memory alloys for designing heat energy recuperators is emphasized by the interest of large international corporations, e.g. the General Motors concern is engaged in the designing of heat energy recuperators based on SMAs (<https://www.fastcompany.com/1538926/gms-working-humanoid-robots-and-shape-memory-alloy-generators>).

However, in spite of its advantages, all devices based on SMAs have a significant drawback - the instability of properties during repeated thermal cycling. Therefore, to create highly efficient devices of multiple action from SMAs, it is necessary to develop scientifically-based methods of suppressing instability while maintaining high values of reversible strain and best performance. This problem was studied by Sibirev A.V. with colleagues since graduate school in 2011, and as part of PhD study, it was shown that one of the effective methods for increasing the stability of the properties of SMAs is to modify the working cycle of the device so that the working body from SMAs realizes incomplete martensitic transformations. In 2014, 2 papers on these results were published. After defending a thesis, Sibirev A.V. continued to work at St. Petersburg State

University. As part of the dissertation research, it was found that the softening processes that occur during the reverse martensitic transformation play a large role in the change in properties during thermocycling of SMAs. Experimental studies of the characteristics of the softening processes in the TiNi alloy were published in 2016. In the future, it was suggested that the intensity of the softening processes depends on temperature. Therefore, over the next year, the effect of intermediate isothermal holdings on the variation in the properties of the TiNi alloy was studied. At the same time, on the basis of the structural-analytical theory developed in the Laboratory of Strength of Materials, a software module, that could take into account thermally activated softening, was developed for calculating the mechanical behavior of SMAs,.

In the framework of cooperation with the Ioffe Institute Sibirev conducted a study of the properties of the NiFeGa alloy, which has significant chances to take the TiNi alloy share in the linear drive materials market. Single crystals of the $\text{Ni}_{55}\text{Fe}_{18}\text{Ga}_{27}$ alloy were grown and investigated. In tensile tests, single crystals showed high values of reversible strain and negligible values of accumulated irreversible strain. Developing international cooperation between St. Petersburg State University and the ITA of the Belarussia National Academy of Sciences, in 2018, Sibirev studied the realization of shape memory effects in bimetallic plates by short-term ultrasonic pulses. As part of the work, the possibility of realizing the shape memory effect using an ultrasonic generator without the use of traditional heating was shown, which significantly expanded the field of application of devices based on SMAs. Later the same year, a study was conducted on the effect of low-temperature holdings on the properties of the TiNi alloy.