

УДК 539.3/6:669.055(075.8)

СПЛАВЫ С ЭФФЕКТОМ ПАМ'ЯТИ ФОРМЫ. ИСТОРИЯ ПОЯВЛЕНИЯ И РАЗВИТИЯ, ФИЗИКА ПРОЦЕССА ИХ УНИКАЛЬНЫХ СВОЙСТВ

О. В. АКИМОВ*, СУНДУС МОХАММЕД НУРИ

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, УКРАЇНА
*email: litvo11@kpi.kharkov.ua

АННОТАЦИЯ Сплавы с эффектом памяти формы в данный час представляют великий интерес. Такие сплавы характерны тем, что у пластично деформованному стані відновлюють свою первинну форму безпосередньо зі зняттям навантаження або після нагрівання. Метою даної роботи є вивчення історії появи і розвитку сплавів з ефектом пам'яті форми і фізики процесу їх унікальних властивостей. Також в роботі розглянуті функціонально-механічні властивості матеріалів з термопружними мартенситними перетвореннями, характеристичні температури та фактори, що впливають на їх величину.

Ключевые слова: сплавы с эффектом памяти формы, мартенситные перетворення, сверхэластичность, псевдоупругость, характеристичные температуры

АННОТАЦИЯ Сплавы с эффектом памяти формы в настоящее время представляют большой интерес. Такие сплавы характерны тем, что в пластически деформированном состоянии восстанавливают свою первоначальную форму непосредственно со снятием нагрузки или после нагрева. Целью данной работы является изучение истории появления и развития сплавов с эффектом памяти формы и физики процесса их уникальных свойств. Также в работе рассмотрены функционально-механические свойства материалов с термоупругими мартенситными превращениями, характеристические температуры и факторы, влияющие на их величину.

Ключевые слова: сплавы с эффектом памяти формы, мартенситное превращение, сверхэластичность, псевдоупругость, характеристические температуры

ALLOYS WITH SHAPE MEMORY EFFECT. THE HISTORY OF THE EMERGENCE AND DEVELOPMENT AND THE PHYSICS OF THEIR UNIQUE PROPERTIES

О. АКИМОВ*, СУНДУС МОХАММЕД НУРИ АХМЕД

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT Alloys with shape memory effect in the present time are of great interest. Such alloys are characterized by the fact that in a plastically deformed state restore its original shape immediately with the removal of the load or after heating. The objective was to study the history of the emergence and development of alloys with shape memory effect. To consider the terms of the manifestations and mechanisms of shape memory effect, functional and mechanical properties of materials with thermoelastic martensitic transformations, characteristic temperature and the factors affecting their value. Today it is urgent to simplify the method of producing alloys with shape memory and to replace expensive components of the chemical composition of the alloy in preserving the unique performance properties at a high level. The greatest interest for modern Ukraine are materials with shape memory effect based on iron. This class of materials is the most cheap and easier to produce, as it doesn't contain expensive components and does not require special vacuum equipment for production.

Keywords: alloys with shape memory effect, martensitic transformation, sergelstorg, pseudopregnant, the characteristic temperature of

Введение

В настоящее время большой интерес представляют сплавы с эффектом памяти формы, которые широко применяются в различных областях техники (спецмашиностроение, приборостроение, авиакосмическая

техника, бытовая техника и др.). При этом наибольшее распространение получили сплавы с памятью формы на основе Ti-Ni, применяемые преимущественно в области медицины, благодаря уникальному сочетанию эксплуатационных свойств.

© О. В. АКИМОВ 1, СУНДУС МОХАММЕД НУРИ, 2015

Сплавы с эффектом памяти формы характерны тем, что в пластически деформированном состоянии восстанавливают свою первоначальную форму непосредственно со снятием нагрузки или после нагрева. Суть этого явления заключается в следующем. В исходном состоянии в материале существует определенная структура. Под влиянием деформации внешние слои материала вытягиваются, а внутренние сжимаются (средние остаются без изменений). Эти вытянутые структуры – мартенситные пластины. Необычным является то, что в материалах с памятью формы мартенсит термоупругий. После нагрева начинает проявляться термоупругость мартенситных пластин, то есть возникают внутренние напряжения, которые стремятся вернуть структуру к исходному состоянию, а именно сжать вытянутые пластины и растянуть сжатые. Поскольку внутренние вытянутые пластины сжимаются, а внутренние растягиваются, материал в целом проводит автодеформацию в обратном направлении и восстанавливает свою исходную структуру, а вместе с ней и форму.

Другим явлением, тесно связанным с эффектом памяти формы, является сверхупругость – свойство материала, который был нагружен до напряжения, значительно превышающего предел прочности, полностью восстанавливать первоначальную форму после снятия нагрузки [1].

Несмотря на такие уникальные свойства материалов с эффектом памяти формы актуальным более детальное изучение таких сплавов и создание новых. Главным недостатком таких сплавов является высокая стоимость и сложность получения с использованием специального вакуумного оборудования. Поэтому на сегодняшний день является актуальным упростить способ получения сплавов с памятью формы и заменить дорогостоящие составляющие химического состава сплава на более доступные с сохранением уникальных эксплуатационных свойств на высоком уровне.

Цель работы

Изучить историю появления и развития сплавов с эффектом памяти формы. Рассмотреть условия проявления и механизмы эффекта памяти формы, функционально-механические свойства материалов с термоупругими мартенситными превраще-

ниями, характеристические температуры и факторы, влияющие на их величину.

История развития сплавов с эффектом памяти формы

В 1948 году академик Г.В. Курдюмов и доктор физико-математических наук Л.Г. Хандрос обнаружили обратимое термоупругое мартенситное превращение на сплавах Cu-Al-Ni и Cu-Sn, которое позднее было официально названо эффектом Курдюмова (эффект восстановления заданной конфигурации или эффект памяти формы). Они обнаружили, что кристаллы образующегося мартенсита при остановке охлаждения могут прекращать рост, а при последующем нагреве уменьшаются в размерах. При этом последовательность исчезновения кристаллов мартенсита при нагреве и обратном превращении мартенсита в высоко-температурную фазу (аустенит) повторяет последовательность их возникновения в обратном порядке [2, 3].

В мировой литературе первое упоминание о сплаве с необычными свойствами датируется 1930-ми годами. В это время Оландер (Ölander, 1932 г.) заметил, что превращение в сплаве Au-Cd было обратимо, основываясь на металлургические наблюдения и сопротивления изменениям [4, 5]. В 1938 г. Дженингер и Моорадиан (Greninger and Mooradian) наблюдали аналогичные изменения в латуни (Cu-Zn) в определенном пределе термических колебаний [6]. Позднее Чанг и Рид (Chang and Read, 1951 г.) ввели впервые термин «эффект памяти формы» для описания термоупругого поведения этих сплавов [7]. Однако только в начале 1960-х годов исследования материалов с эффектом памяти формы (или как их еще называют «умные материалы») начали набирать популярность. В 1962–1963 гг. Бюлер (Buehler) и др. обнаружили, что никель-титановые сплавы, называемые Нитинол (происходит от аббревиатуры NiTiNOL, где NOL – это сокращенное название Лаборатории морской артиллерии США, где этот материал был разработан), также обладают эффектом памяти формы [1, 5, 8]. В настоящее время именно этот сплав стал лидером среди материалов с памятью формы.

Нитинол или никелид титана – это интерметаллид эквиатомного состава с 49–57 % Ni, количество титана всегда должно оставаться в пределах 38–50 %, т.к. именно

этот предел обеспечивает эффект памяти формы таких сплавов. Часто сплавы Ni-Ti легируют медью. Температура плавления нитинола составляет 1240–1310 °С, плотность сплава – 6,45 г/см³. Исходная структура никелида титана – стабильная объемно-центрированная кубическая решетка типа CsCl при деформации испытывает термоупругое мартенситное превращение с образованием фазы низкой симметрии [1, 10].

Никелид титана обладает высокой коррозионной стойкостью и прочностью, хорошими характеристиками формо-запоминания, имеет высокий коэффициент восстановления формы и высокую восстановительную силу, деформация до 8 % может полностью восстанавливаться, напряжение восстановления при этом может достигать 800 МПа. Также нитинол обладает хорошей совместимостью с живыми организмами, имеет высокую демпфирующую способность материала (способность материала поглощать вибрацию (циклические нагрузки) за счет внутреннего трения, превращая механическую энергию в тепло).

Но у столь популярного сплава существуют и недостатки: 1. Наличие титана способствует легкому присоединению к сплаву азота и кислорода. Чтобы предотвратить реакции с этими элементами при производстве надо использовать вакуумное оборудование. 2. Затруднена обработка при изготовлении деталей, особенно резанием (оборотная сторона высокой прочности). 3. Высокая цена.

Производство никелида титана заключается в следующем: плавка происходит в вакуумно-гарнисажной печи или в электродуговой печи с использованием электродов в защитной атмосфере (гелий или аргон). Шихтой в обоих случаях служит йодидный титан или титановая губка, спрессованная в брикеты, и никель марки Н-0 или Н-1 [9].

Для получения равномерного химического состава по сечению и высоте слитка рекомендуется двойной или тройной переплав. При выплавке в дуговой печи рекомендуется сила тока 1,2 кА, напряжение 40 В, давление гелия 53 МПа. Оптимальный режим охлаждения слитков с целью предотвращения растрескивания – охлаждение с печью (не более 10 ° в секунду). Удаление поверхностных дефектов – обдирки наждачным кругом. Для более полного выравнивания химического состава по объему слитка

проводят гомогенизацию при температуре 950–1000 °С в инертной атмосфере [10-13].

Помимо нитинола, существуют и другие сплавы, обладающие эффектом памяти формы. Сплав Au-Cd разработан в 1951 году, является одним из пионеров материалов с памятью формы. Наравне с нитинолом, сплав Cu-Zn-Al имеет широкое практическое применение, этот сплав можно выплавлять в обычной атмосфере. Некоторые сплавы, обладающие эффектом памяти формы представлены в табл. 1 [14–19].

Таблица 1. Некоторые сплавы, проявляющие эффект памяти формы

Сплав	Состав	Диапазон превращения (°С)
Ag–Cd	44–49 % Cd	–190 ÷ –50
Au–Cd	46,5–50 % Cd	30 ÷ 100
Cu–Al–Ni	14–41,5 % Al; 3–4,5 % Ni	–140 ÷ 100
Cu–Au–Zn	23–28 % Au; 45–47 % Zn	–190 ÷ 40
Cu–Sn	15 % Sn	–120 ÷ 30
Cu–Zn	38,5–41,5 % Zn	–180 ÷ –10
Cu–Zn–Al	3–8 % Al 4–6 % Al; 22– 28 % Zn	0 ÷ 150 Комнатная температура
In–Ti	18–23 % Ti	60 ÷ 100
Ni–Al	36–38 % Al	–180 ÷ 100
Ni–Ti	49–51 % Ni	–50 ÷ 110
Fe–Pd	30 % Pd	–100
Fe–Pt	25 % Pt	–130
Mn–Cu	5–35 % Cu	–250 ÷ 180
Fe–Mn–Si	32 % Mn; 6 % Si	–200 ÷ 150

Условия проявления и механизмы эффекта памяти формы

Причиной эффекта памяти формы являются фазовые переходы с обратимым изменением размеров кристаллов новой фазы при изменении температуры или напряжения, а именно мартенситное термоупругое превращение [1, 10].

Мартенситное превращение – разновидность полиморфного фазового перехода с изменением типа кристаллической решетки. Инициировать мартенситное превращение, как и любое другое, можно двумя путями – это или изменение температуры или механическое напряжение.

Материал, испытывающий мартенситное превращение, может находиться в нескольких

состояниях: мартенситном, аустенитном и смешанном.

Мартенситные превращения разделяются на взрывные и термоупругие.

Взрывное превращение характеризуется тем, что при некоторой температуре (температуре начала превращения) скачком образуется достаточно большое количество кристаллов мартенсита, которые сразу достигают некоторых размеров и больше не растут. В случае дальнейшего охлаждения происходит образование уже новых мартенситных кристаллов.

При термоупругом мартенситном превращении изменение температуры влияет не только на появление кристаллов мартенсита, но и на их величину, т. е. при охлаждении появившиеся первыми кристаллы мартенсита растут за счёт соседних областей.

Мартенсит – это низкотемпературная фаза состояния сплава, аустенит – высокотемпературная фаза состояния сплава. В смешанном состоянии присутствуют и мартенсит, и аустенит. Мартенсит, как правило, имеет решетку с более низкой симметрией, чем аустенит.

Температуры, характеризующие переход из одной фазы в другую, называются характеристическими (ХТ) и обозначаются:

M_n, M_k – температуры начала и конца мартенситного превращения;

A_n, A_k – температуры начала и конца аустенитного перехода.

На рис. 1 представлен процесс фазового перехода из аустенита в мартенсит и обратно. Это может происходить многократно во время охлаждения из высокотемпературного состояния в низкотемпературное и последующем нагреве [1].

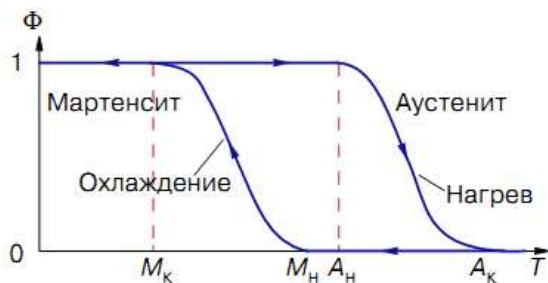


Рис. 1 – Схема температурной зависимости содержания мартенситной фазы при прямом и обратном мартенситных превращениях

При охлаждении сплава в интервале температур от A_k до M_n (рис. 1) процентное

содержание мартенситной фазы равно нулю, сплав находится в аустенитном состоянии. Первые кристаллы мартенсита зарождаются при температуре M_n – температуре начала прямого мартенситного перехода. Температуру M_k , при которой весь объем заполнен мартенситом, называют температурой конца прямого мартенситного превращения. При последующем нагревании металл находится в мартенситном состоянии вплоть до температуры A_n – начала обратного мартенситного перехода, а при достижении температуры A_k – конца обратного мартенситного перехода, процесс заканчивается и весь материал переходит в аустенитное состояние. Зарождение кристаллов происходит не одновременно: одни появляются раньше, другие позже. Экспериментально показано, что в присутствии напряжений интенсивнее растут те кристаллы, которые благоприятно ориентированы по отношению к приложенному напряжению. Для реальных обратных мартенситных переходов данная диаграмма не имеет ярко выраженных изломов в точках, как и показано на рис. 1, соответствующих M_n, M_k, A_n, A_k .

Функционально-механические свойства материалов с термоупругими мартенситными превращениями

Материалам с термоупругими мартенситными превращениями характерен целый ряд уникальных, нетрадиционных физико-механических свойств, выделяющий их из класса обычных конструкционных металлов и сплавов. Совокупность явлений, которая связана с обратимыми мартенситными реакциями (мартенситная неупругость) обнаруживается, в основном, в интервале температур $M_k \div A_k$. Мартенситная неупругость представляет третий, после упругости и пластичности, основной вид деформационного поведения кристаллических материалов.

Закономерности проявления мартенситной неупругости обусловлены происходящими в материалах необычными структурными перестройками: термоупругим мартенситным превращением (структурным фазовым переходом I рода), упругим двойникованием (геометрически обратимым деформационным процессом), а также движением частичных и сверхструктурных дислокаций. Форма проявления такой неупругости в виде реакции материала на изменение температуры, внешнего или

внутреннего напряжения может быть конкретной: эффект памяти формы; обратимая память формы; циклическая память формы; эффект реверсивной памяти формы; пластичность прямого превращения; пластичность обратного превращения; псевдоупругость; деформация ориентированного превращения.

Эффект однократной памяти формы заключается в способности материала при изменении температуры (без нагрузки) возвращать приобретённые ранее (в мартенситном состоянии) неупругие деформации и восстанавливать первоначальную форму.

Кроме однократного эффекта восстановления формы, существует эффект обратимой памяти формы, который может быть неоднократно воспроизведён при термоциклировании. Материал, которому была задана значительная пластическая деформация, может самопроизвольно деформироваться при термоциклировании в интервале температур мартенситных переходов. Причиной этого эффекта является возникновение в материале во время предварительного деформирования (либо за счёт активного деформирования, либо за счёт эффекта пластичности превращения) больших внутренних полей напряжений, которые полностью не исчезают при нагревании. При многократном термоциклировании сплава под постоянным напряжением можно наблюдать обратимое циклическое формоизменение.

Эффектом пластичности превращения (сверхпластичности) называется способность материала накапливать деформацию, даже при весьма малых напряжениях, во время прохождения мартенситного превращения, которое сопровождается резким снижением сопротивления пластическому деформированию. Таким образом, в защемлённых и напряжённых изделиях напряжения уменьшаются, нередко до нуля, при охлаждении до M_c . Возвращаемая деформация может достигать от 20–30 % до 100 %.

Как известно, мартенситное превращение бывает прямым и обратным. Прямым мартенситным превращением принято считать накопление деформации при охлаждении, обратным – при нагреве.

Эффект реверсивной памяти формы заключается в том, что материалу сообщается остаточная деформация последовательно разными способами. Эти деформации могут быть разного знака и приблизительно равными

по модулю. В этом случае при нагревании наблюдается сначала восстановление одной деформации, а затем при дальнейшем нагреве восстановление другой деформации. Так как суммарная накопленная деформация равнялась нулю, то в процессе восстановления итоговая деформация также будет равна нулю.

Эффектом сверхэластичности называется явление восстановления первоначальной формы деформированного сплава, обусловленное изменением его фазового состояния вследствие снятия нагрузки, вызвавшей деформацию. Эффекты памяти формы и сверхэластичности имеют одну природу, однако не все сплавы с памятью формы проявляют сверхэластичные свойства. Причина отсутствия сверхэластичности в ряде сплавов связана с их особыми механическими свойствами.

Псевдоупругость (или сверхупругость) – способность материала при разгрузке в изотермических условиях восстанавливать значительные неупругие деформации от значений упругих деформаций в 1–2 % до 30 %. Наиболее существенное влияние на псевдоупругие свойства сплава оказывают ширина гистерезиса превращений и расположение температуры деформирования относительно характеристических температур. Помимо этого, величина псевдоупругой деформации и кинетика восстановления формы зависят от: температуры деформирования, состава сплава, вида напряжённого состояния, скорости деформирования, старения сплава и др.

Формовосстановление материала с эффектом памяти формы происходит столь интенсивно, что в ряде случаев возврат деформации не удаётся подавить даже напряжением, близким к пределу прочности [1]. Это означает, что материал с каналами мартенситной неупругости способен развивать высокие напряжения, реагируя на сопротивление свободному возврату деформации. Они получили название реактивных напряжений.

Характеристические температуры и факторы, влияющие на их величину

Температуры, характеризующие переход из одной фазы в другую, называются характеристическими температурами мартенситных превращений. Для обратимых мартенситных превращений характерна зависимость фазового состава от температуры,

представленная на рис. 1. Ширина гистерезиса кривых по температурной шкале, т. е. $A_n - M_k$ или $A_k - M_n$, может быть различной для разных материалов и сильно влияет на их механические свойства вблизи температур фазового превращения. Гистерезис может быть как широким, так и узким. При анализе подобных диаграмм вводят обычно еще три характеристические температуры: T_0 , M_d , A_d , где T_0 – температура термодинамического равновесия; M_d – температура, ниже которой мартенсит может возникнуть не только вследствие понижения температуры, но и под действием механического напряжения; температура A_d характеризует возможность образования выше её аустенита не только вследствие нагрева, но и за счет механической нагрузки [5].

Оказывается весьма существенным, что для материалов с широким и узким гистерезисом взаимное расположение характеристических температур может оказаться неодинаковым. Характер влияния температуры на фазовый состав материала оказывается чрезвычайно важным в формировании упругопластических свойств кристаллов. Как показывает опыт, вся совокупность явлений, связанных с обратимыми мартенситными реакциями, обнаруживается при температурах, не очень сильно выходящих за интервал $M_k - A_k$. На характеристические температуры оказывают влияние различные факторы: химический состав, напряжения, деформации, отжиг.

В настоящее время установлено, что температуры мартенситных превращений изменяются с различной интенсивностью в зависимости от характера легирования, легирующего элемента и от того, является ли он элементом внедрения или элементом замещения. Одни добавки сильно смещают температуры превращений, другие – незначительно. Например, в системе TiNiX железо понижает температуры превращений сильнее, чем кобальт, но слабее, чем марганец, а медь и кремний в довольно широком интервале концентраций могут практически не изменять температуры фазовых переходов [1, 5]. Причём не только величина изменения, но даже и знак его могут оказаться различными для M_n , M_k , A_n и A_k . Поэтому, вариации в химическом составе сплава сказываются и на ширине гистерезиса. Так, медь, вводимая в TiNi в качестве заместителя никеля, при определенных концентрациях резко расширяет

гистерезис превращения, а железо, кобальт и германий почти не сказываются на нём.

Весьма сильные смещения температурных переходов наблюдаются при отклонении состава соединений от стехиометрического. У интерметаллида TiNi при изменении концентрации Ni от 50 до 52 ат. % температуры фазовых переходов снижаются почти на 300-400 К, а обогащение титаном на такую же величину практически не влияет на характеристические температуры. Исследовано влияние отклонения состава соединений TiAu, TiPd и TiPt от стехиометрического назначения характеристических температур. Для данных материалов наблюдается мартенситный переход с образованием структуры типа B19 (при 20°C). За счёт изменения химического состава даже путём весьма экономного легирования удаётся изменять характеристические температуры прямого и обратного мартенситных превращений и ширину гистерезиса в необходимом температурном диапазоне, что даёт возможность управления физико-механическими свойствами материалов в отмеченном интервале. Если учесть, что обращение к различным металлическим системам также является способом выбора нужных температур перехода, то можно сказать, что в настоящее время освоено весьма широкий диапазон температур: от 4,2 до ~ 1300 К.

Для различных материалов с эффектом памяти формы влияние напряжений на температуры мартенситных превращений неодинаково. В некоторых случаях оно так мало, что им можно пренебречь, например для медномарганцевых сплавов, испытывающих ГЦК ↔ ГЦТ антиферромагнитное упорядочение. В других влияние велико и различно для температур M_n , A_k и M_k , A_n , как у интерметаллида TiNi. Установлено качественно одинаковое воздействие напряжений на температуры M_n и A_k при любом виде деформирования: сжатии, растяжении, двухосном растяжении, кручении и т. п. Общая закономерность заключается в довольно резком повышении температур M_n и A_k и сравнительно слабом смещении M_k и A_n с разным знаком смещения температур в зависимости от схемы напряжённого состояния, объёмного эффекта превращения и свойств материала. Деформации также сказываются по-разному на изменении характеристических температур в зависимости от материала. В сплаве CuMn даже весьма значительные пластические деформации не

вливают на температуры фазовых переходов, а в TiNi они смещаются весьма существенно. При больших деформациях аустенитной фазы прямое мартенситное превращение затрудняется, так что соответствующие характеристические температуры понижаются. Наклёп мартенсита приводит, как правило, к повышению температур обратного перехода. В целом же на значения A_n , A_k и M_n , M_k влияет не только величина деформации, но и условия её задания – температура, скорость и способ деформирования. Так, активная деформация и деформация, полученная путём нагревания или охлаждения материала под напряжением в интервале мартенситного превращения, приводят к разным результатам. Однако имеется возможность восстановления характеристических температур, смещённых в результате деформации, путём отжига металла.

Структурно-чувствительными функциональными свойствами сплавов с эффектом памяти формы можно эффективно управлять с помощью термической и низко- и высоко-термомеханической обработок, которые позволяют регулировать структуру и фазовое состояние. С помощью таких обработок можно даже «исправлять» неточность химического состава плавки (изменение состава сплава на 0,1 % приводит к изменению температуры M_n на 10–20 °C) [1].

Выводы

Изучена история появления и развития сплавов с эффектом памяти формы. Рассмотрены условия проявления и механизмы эффекта памяти формы, функционально-механические свойства материалов с термоупругими мартенситными превращениями, характеристические температуры и факторы, влияющие на их величину.

На сегодняшний день является актуальным упростить способ получения сплавов с памятью формы и заменить дорогостоящие составляющие химического состава сплава на более доступные с сохранением уникальных эксплуатационных свойств на высоком уровне. Наибольший интерес для современной Украины представляют материалы с эффектом памяти формы на основе железа. Этот класс материалов является наиболее дешевым и более простым в производстве, так как не содержит дорогостоящих составляющих и не требует специального вакуумного оборудования для производства.

Список литературы

1. Сплавы с эффектом памяти формы / **К. Ооцука** [и др.]; под ред. Х. Фунакубо. – М. : Металлургия, 1990. – 224 с.
2. **Курдюмов, Г. В.** О природе бездиффузных мартенситных превращений / **Г. В. Курдюмов** // *ДАН СССР*. – 1948. – Т. 60. – № 9. – С. 1543–1546.
3. **Курдюмов, Г. В.** О термоупругом равновесии при мартенситных превращениях / **Г. В. Курдюмов, Л. Г. Хандрос** // *ДАН СССР*. – 1948. – Т. 60. – № 2. – С. 211–220.
4. **Otsuka, Ed. K.** Shape memory materials / **Ed. K. Otsuka, C. M. Wayman** // Cambridge University Press, 1999. – 284 p.
5. **Barbarino, S.** A review on shape memory alloys with applications to morphing aircraft / **S. Barbarino, E. I. Saavedra Flores, R. M. Ajaj, I. Dayyani, M. I. Friswell** // *Smart Mater. Struct.* – 2014. – № 23 (063001). – P. 1 – 19. doi:10.1088/0964-1726/23/6/063001
6. **Greninger, A. B.** Strain transformation in metastable beta copper–zinc and beta copper–tin alloys / **A. B. Greninger, V. G. Mooradian** // *Trans. AIME*. – 1938. – № 128. P. 68–337.
7. **Chang, L. C.** Plastic deformation and diffusionless phase changes in metals—the gold–cadmium beta phase / **L. C. Chang, T. A. Read** // *Trans. AIME*. – 1951. – № 189. P. 47–52.
8. **Buehler, W. J.** Effect of low-temperature phase changes on the mechanical properties of alloys near composition TiNi / **W. J. Buehler, J. V. Gilfrich, R. C. Wiley** // *Appl. Phys.* – 1963. – № 34. – P. 1475
9. **Jani, J. M.** A Review of Shape Memory Alloy Research, Applications and Opportunities / **J. M. Jani, M. Leary, A. Subic, M. A. Gibson** // *Materials & Design*. – 2014. – № 56. – P. 1078–1113. doi:10.1016/j.matdes.2013.11.084.
10. Shape Memory Alloy Shape Training Tutorial. (PDF). Retrieved on 2011-12-04: <http://www-personal.umich.edu/~btrease/share/SMA-Shape-Training-Tutorial.pdf>
11. **Huang, S.** Optimisation of Ni–Ti shape memory alloy response time by transient heat transfer analysis / **S. Huang, Martin Leary, Tamer Attalla, K. Probst, A. Subic** // *Materials & Design*. – 2012. – № 35. – P. 655–663. doi:10.1016/j.matdes.2011.09.043.
12. **Miyazaki, S.** Development and characterization of Ni-free Ti-base shape memory and superelastic alloys / **S. Miyazaki, H. Y. Kim, H. Hosoda** // *Mat Sci Eng a-Struct.* – 2006. – № 438. – P. 18–24. doi: 10.1016/j.msea.2006.02.054.
13. **Mereau, T. M.** Nitinol compression staples for bone fixation in foot surgery / **T. M. Mereau, T. C. Ford** // *Journal of the American Podiatric Medical Association*. – 2006. – № 96 (2). – P. 6–102. doi:10.7547/0960102. PMID 16546946.
14. **Bolcich, J. C.** Energy conversion using pseudoelastic CuZnAl alloys – a prototype heat

- engine / **J. C. Bolcich, R. Rapacioli** // *J. phys. (fr.) ICOMAT-82*. – 1982. – Vol. 43. – N 12. – P. 831-832.
15. **Honma, T.** Применение сплавов с эффектом запоминания формы и связанные с этим проблемы / **T. Honma** // *Chem. Ind. (Japan)*. – 1982. – Vol. 33. – N 4. – P. 339-346.
16. **Eisenwasser, J. D.** Pseudoelasticity and the strain – memory effect in CuZnSn alloys / **J. D. Eisenwasser, L. L. Brown** // *Trans.* – 1972. – V.3. – N 6. – P. 1359-1383.
17. **Hodgson D. E.** Shape memory alloys / **D. E. Hodgson, M. H. Wu, R. J. Biermann** // *ASM Handbook: ASM International*. – 1990. – P. 897–902
18. **Hartl, D. J.** Aerospace applications of shape memory alloys / **D. J. Hartl, D. C. Lagoudas** // *P I Mech Eng G-J Aer*. – 2007. - № 221 (G4). – P. 535-552. doi: 10.1243/09544100jaero211.
19. **Dilibal, S.** On the Volume Change in Co-Ni-Al during Pseudoelasticity / **S. Dilibal, H. Sehitoglu, R. Hamilton, H. J. Maier, Y. Chumlyakov** // *Materials Science and Engineering A*. – 2011. - № 528. – P. 2875–2881.
20. **Bolcich, J. C., Rapacioli R.** Energy conversion using pseudoelastic CuZnAl alloys – a prototype heat engine. *J. phys. (fr.) ICOMAT-82*, 1982, **43** (12), 831-832.
21. **Honma, T.** The use of alloys with shape memory effect and associated problems. *Chem. Ind. (Japan)*, 1982, **33** (4), 339-346.
22. **Eisenwasser, J. D., Brown L. L.** Pseudoelasticity and the strain – memory effect in CuZnSn alloys. *Trans*, 1972, **3** (6), 1359-1383.
23. **Hodgson D. E., Wu M. H., Biermann R. J.** Shape memory alloys. *ASM Handbook: ASM International*, 1990, 897–902
24. **Hartl, D. J., Lagoudas D. C.** Aerospace applications of shape memory alloys. *P I Mech Eng G-J Aer*, 2007, **221** (G4), 535-552. doi: 10.1243/09544100jaero211.
25. **Dilibal, S., Sehitoglu H., Hamilton R., Maier H. J., Chumlyakov Y.** On the Volume Change in Co-Ni-Al during Pseudoelasticity. *Materials Science and Engineering A*, 2011, **528**, 2875–2881.
26. **Jani, J. M., Leary M., Subic A., Gibson M. A.** A Review of Shape Memory Alloy Research, Applications and Opportunities. *Materials & Design*, 2014, **56**, 1078–1113. doi:10.1016/j.matdes.2013.11.084.
27. Shape Memory Alloy Shape Training Tutorial. (PDF). Retrieved on 2011-12-04: <http://www-personal.umich.edu/~btrease/share/SMA-Shape-Training-Tutorial.pdf>
28. **Huang, S. Martin Leary, Tamer Attalla, Probst K., Subic A.** Optimisation of Ni–Ti shape memory alloy response time by transient heat transfer analysis. *Materials & Design*, 2012, **35**, 655–663. doi:10.1016/j.matdes.2011.09.043.
29. **Miyazaki, S. Kim H. Y., Hosoda H.** Development and characterization of Ni-free Ti-base shape memory and superelastic alloys. *Mat Sci Eng a-Struct*, 2006, **438**, 18-24. doi: 10.1016/j.msea.2006.02.054.
30. **Mereau, T. M., Ford T. C.** Nitinol compression staples for bone fixation in foot surgery. *Journal of the American Podiatric Medical Association*, 2006, **96** (2), 6–102. doi:10.7547/0960102. PMID 16546946.

References

1. Alloys with shape memory effect. **K. Ootsuka** [and others]; edited by H. Funakubo. - Moscow : Metallurgy, 1990, 224.
2. **Kurdyumov, G. C.** On the nature of bitdefender martensitic transformations. *DAN SSSR*, 1948, **60** (9), 1543-1546.
3. **Kurdyumov, G. C., Andros, L.** Thermoelastic equilibrium when the martensite transformation. *DAN SSSR*, 1948, **60** (2), 211-220.
4. **Otsuka, Ed. K., Wayman C. M.** Shape memory materials. *Cam-bridge University Press*, 1999, 284.
5. **Barbarino, S., Saavedra Flores E. I., Ajaj R. M., Dayyani I., Friswell M. I.** A review on shape memory alloys with applications to morphing aircraft. *Smart Mater. Struct*, 2014, **23** (063001), 1–19. doi:10.1088/0964-1726/23/6/063001
6. **Greninger, A. B., Mooradian V. G.** Strain transformation in metastable beta copper–zinc and beta copper–tin alloys. *Trans. AIME*, 1938, **128**, 68–337.
7. **Chang, L. C., Read T. A.** Plastic deformation and diffusionless phase changes in metals—the gold–cadmium beta phase. *Trans. AIME*, 1951, **189**, 47–52.
8. **Buehler, W. J., Gilfrich J. V., Wiley R. C.** Effect of low-temperature phase changes on the mechanical

Надійшла (received) 17.02.2015