



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
G01N 29/14 (2019.08)

(21)(22) Заявка: 2019100630, 10.01.2019

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
10.01.2019

Дата регистрации:
03.02.2020

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 10.01.2019

(45) Опубликовано: 03.02.2020 Бюл. № 4

Адрес для переписки:
656049, г. Барнаул, пр. Ленина, 61, ФГБОУ ВО
"Алтайский государственный университет",
ЦРТПТТУИС

(72) Автор(ы):

Грязнов Александр Сергеевич (RU),
Плотников Владимир Александрович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Алтайский государственный
университет" (RU)

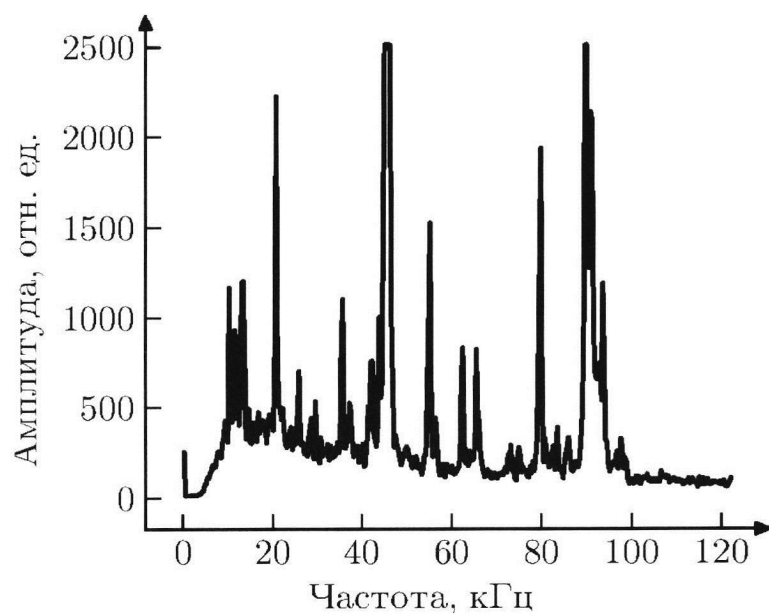
(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: Хачин В.Н., Муслов С.А., Пушин
В.Г., Чумляков Ю.И. Аномалии упругих
свойств монокристаллов TiNi-TiFe, ДАН
СССР, 1987, т. 295, N 3. с. 606-609. RU 2525320
C1, 10.08.2014. RU 2618760 C1, 11.05.2017. RU
2345355 C1, 27.01.2009. CN 108037185 A,
15.05.2018. CN 204436964 U, 01.07.2015.

(54) Способ контроля структурного состояния сплавов на основе никелида титана

(57) Реферат:

Использование: для контроля структурного
состояния сплавов на основе никелида титана
при охлаждении сплава в температурном
интервале, содержащем интервал превращений.
Сущность изобретения заключается в том, что в
цикле термоупругих мартенситных превращений
в никелиде титана регистрируют поток сигналов
акустической эмиссии, проводят спектральный
анализ, фиксируют снижение характерных
спектральных линий от 138-132 до 124-126 кГц
при охлаждении в температурном интервале
превращений от 140°C до 50°C и по окончании

снижения характерных спектральных линий
определяют структурное состояние как
мартенситное. Технический результат: повышение
точности контроля упругих модулей
структурного состояния в сплавах на основе
никелида титана, претерпевающих термоупругие
мартенситные превращения, повышение
производительности контроля путем регистрации
и анализа потока сигналов акустической эмиссии
в одном цикле термоупругих мартенситных
превращений. 1 табл., 8 ил.



Низкочастотная область спектра потока сигналов акустической эмиссии в ходе прямого мартенситного превращения В2→В19' в никелиде титана.

Фиг. 5



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(19) **RU** (11)
(51) Int. Cl.
G01N 29/14 (2006.01)

2 713 020 ⁽¹³⁾ **C1**

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC
G01N 29/14 (2019.08)

(21)(22) Application: **2019100630, 10.01.2019**

(24) Effective date for property rights:
10.01.2019

Registration date:
03.02.2020

Priority:

(22) Date of filing: **10.01.2019**

(45) Date of publication: **03.02.2020** Bull. № 4

Mail address:

**656049, g. Barnaul, pr. Lenina, 61, FGBOU VO
"Altajskij gosudarstvennyj universitet",
TSRTPPTUIS**

(72) Inventor(s):

**Gryaznov Aleksandr Sergeevich (RU),
Plotnikov Vladimir Aleksandrovich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**federalnoe gosudarstvennoe byudzhetnoe
obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego
obrazovaniya "Altajskij gosudarstvennyj
universitet" (RU)**

(54) **METHOD OF CONTROLLING STRUCTURAL CONDITION OF ALLOYS BASED ON TITANIUM NICKELIDE**

(57) Abstract:

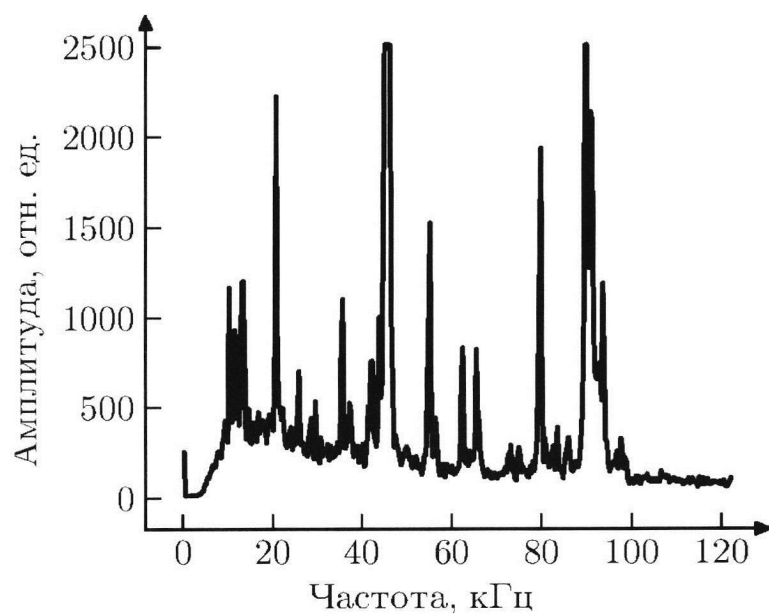
FIELD: metallurgy.

SUBSTANCE: use: for controlling the structural state of titanium nickelide-based alloys while cooling the alloy in a temperature range containing the transformation interval. Summary of invention consists in the fact that in the cycle of thermoelastic martensitic transformations in titanium nickelide there recorded is the stream of acoustic emission signals, performing spectral analysis, reduction of characteristic spectral lines from 138–132 to 124–126 kHz at cooling in temperature range of transformations from 140 °C to

50 °C and after termination of characteristic spectral lines decrease, structural condition is determined as martensitic.

EFFECT: technical result is high accuracy of controlling elastic moduli of structural state in alloys based on titanium nickelide, which undergo thermoelastic martensitic transformations, high efficiency of monitoring by recording and analyzing the flow of acoustic emission signals in one cycle of thermoelastic martensitic transformations.

1 cl, 1 tbl, 8 dwg



Низкочастотная область спектра потока сигналов акустической эмиссии в ходе прямого мартенситного превращения В2→В19' в никелиде титана.

Фиг. 5

Изобретение относится к способу контроля упругих модулей в никелиде титана в интервале температур, содержащем интервал обратимых термоупругих мартенситных превращений, определяющих эффект памяти формы и сверхэластичность, и может быть использовано для контроля структурного состояния и упругих модулей этого материала.

Известен способ определения упругих модулей путем измерения скоростей продольных и поперечных (сдвиговых) волн в кристаллах [1]. По известным формулам, связывающим скорость V распространения волн, плотности вещества ρ и упругих модулей C_{11} , C_{12} , C_{44} , вычисляются упругие модули [2]

$$\frac{1}{2}(C_{11}+C_{12}+2C_{44}) = \rho V_1^2$$

$$\frac{1}{2}(C_{11}-C_{12}) = \rho V_2^2$$

$$C_{44} = \rho V_3^2$$

Здесь V_1 , V_2 , V_3 - скорости продольной и двух поперечных волн в кубических кристаллах соответственно. Способ отличается трудоемкостью и низкой точностью особенно при измерении скорости упругих волн в никелиде титана в температурном интервале, содержащем интервал обратимых термоупругих мартенситных превращений.

Известны исследования поведения упругих модулей в монокристаллах никелида титана методом составного вибратора [3,4]. Согласно исследованиям, в монокристаллах сплавов Ti-49,5 ат. % Ni и Ti-51, ат. % Ni [3] и $Ti_{50}Ni_{50-x}Fe_x$ [4] при охлаждении протекают термоупругие мартенситные превращения $B2 \rightarrow B19'$ и $B2 \rightarrow R \rightarrow B19'$ соответственно. В ходе превращений (даже несколько раньше) наблюдается аномальное снижение упругих модулей $\frac{1}{2}(C_{11}-C_{12})$, C_{44} и фактора упругой анизотропии, равный отношению модулей $A = 2C_{44}/(C_{11}-C_{12})$, характеризующий наличие выделенных направлений в кристаллах, если его величина велика, и изотропное состояние кристалла, если его величина мала, а его приближение к нулю свидетельствует о размягчении решетки по всем кристаллографическим направлениям. Причем аномально снижаются в интервале мартенситного превращения претерпевают и модуль Юнга, и модуль сдвига. Фактор же упругой анизотропии скачком снижается уже при достижении температуры превращения $B2 \rightarrow BR$ в сплаве Ti-51, ат. % Ni. Поведение упругих модулей в интервале температур мартенситных превращений являются определяющими для реализации эффектов сверхэластичности и памяти формы в никелиде титана. Метод составного вибратора, используемый в этих исследованиях сложен и трудоемок особенно при измерениях в температурных интервалах.

Целью изобретения является повышение точности контроля упругих модулей, структурного состояния в сплавах на основе никелида титана, претерпевающих термоупругие мартенситные превращения, повышение производительности контроля путем регистрации и анализа потока сигналов акустической эмиссии в одном цикле термоупругих мартенситных превращений.

Сущность изобретения. Осуществляют цикл термоупругих мартенситных превращений в никелиде титана путем нагрева и охлаждения образца в температурном интервале, содержащем интервал превращений. В цикле термоупругих мартенситных превращений в никелиде титана регистрируют поток сигналов акустической эмиссии. Проводят спектральный анализ потока сигналов акустической эмиссии. Фиксируют снижение характерных спектральных линий от 138-132 до 124-126 кГц при охлаждении в температурном интервале превращений от 140°C до 50°C и по окончании снижения характерных спектральных линий определяют структурное состояние как мартенситное.

Фиксируют смещение характерных спектральных линий в температурном интервале

термоупругих мартенситных превращений и фиксируют изменения спектральных линий программным путем с помощью «Визуализатора динамики спектра» [5] программы «Регистратора данных АЦП» [6].

По характерным частотам спектра акустической эмиссии определяют длины стоячих акустических волн λ , сформированных на образце никелида титана как на наборе резонаторов, где длина волны связана с частотой f спектральной линии выражением $\lambda = VT = V/f$. То есть длина волны увеличивается, если частота резонанса снижается.

Изменение длин волн обусловлено изменением скоростей распространения упругих акустических волн в образце, а изменение скоростей упругих волн при неизменной

геометрии образца и плотности позволяют в соответствии с формулой $C_{44} = V^2_3/\rho$, или $\frac{1}{2}(C_{11} - C_{44}) = V^2_2/\rho$, или $\frac{1}{2}(C_{11} + C_{12} + 2C_{44}) = V^2_1/\rho$ определять снижение упругих модулей в никелиде титана в ходе термоупругих мартенситных превращений.

По снижению характерных резонансных частот стоячих волн акустической эмиссии в образце в зависимости от температуры контролируют структурное состояние никелида титана: начало активного снижения соответствует началу мартенситного превращения $B2 \rightarrow B19'$ или $B2 \rightarrow R \rightarrow B19'$; конец снижения отвечает окончанию мартенситных превращений и приобретению свойств материала для реализации эффекта памяти формы и сверхэластичности.

Краткое описание чертежей

Фиг. 1. Эффект сверхэластичности (а,б) и памяти формы (в) в никелиде титана. 1 - накопление деформации при охлаждении и возврат деформации при нагреве, 2 - температура в цикле охлаждение-нагрев образца, 3 - величина обратимой деформации в цикле, 4 величина остаточной деформации, накопленной в серии циклов, 5 - остаточная деформация в цикле.

Фиг. 2. Акустическая эмиссия в цикле термоупругих мартенситных превращений в сплаве Ti50Ni49.9Mo0.1: 6, 7 - зависимость среднеквадратичного напряжения акустической эмиссии от времени при прямом (7) и обратном (6) превращениях; 8 - температура в цикле нагрев-охлаждение.

Фиг. 3. Блок-схемы экспериментальных установок: 9 - образец, 10 - волновод, 11 - неподвижный держатель, 12 - подвижный держатель, 13 - пьезодатчик с предварительным усилителем, 14 - усилитель, 15 - нагреватель, 16 - термopара, 17 - датчик деформации, 18 - датчик нагружения, 19 - аналого-цифровой преобразователь, компьютер.

Фиг. 4. Частотный спектр сигналов акустической эмиссии в системе образец - волновод в ходе превращения $B2 \rightarrow B19'$.

Фиг. 5. Низкочастотная область спектра потока сигналов акустической эмиссии в ходе прямого мартенситного превращения $B2 \rightarrow B19'$ в никелиде титана.

Фиг. 6. Резонансы, сформированные в образце никелида титана: 20, 21, 22 - номер цикла термоупругих мартенситных превращений.

Фиг. 7. Динамика спектральных линий сигналов акустической эмиссии в ходе термоупругого мартенситного превращения в никелиде титана в интервалах: а) - 60-80 кГц, б) - 120-140 кГц.

Фиг. 8. Зависимость смещения спектральных линий (23, 24, 25, 26) от температуры: I - спектральные линии около температуры начала превращения $B2 \rightarrow B19'$; II - спектральные линии около температуры конца превращения $B2 \rightarrow B19'$.

Примеры конкретного выполнения. Пример 1.

Никелид титана представляет собой сплав никеля с титаном в стехиометрическом

соотношении Ti-50,0 ат. % Ni. Как правило, это соотношение на практике сложно выполнить, поэтому под никелидом титана понимают сплавы с концентрацией никеля от 49 до 51 ат. %. Кроме того, сплав эффективно легируется другими элементами (Fe, Cu, Mo, и др.) для изменения физико-механических свойств, в том числе сверхэластичности и эффекта памяти формы. За реализацию эффектов сверхэластичности и памяти формы ответственны обратимые термоупругие мартенситные превращения: прямые при охлаждении $B2 \rightarrow B19'$, $B2 \rightarrow B19$, $B2 \rightarrow R \rightarrow B19'$ и обратные при нагреве $B19' \rightarrow B2$, $B19 \rightarrow B2$, $B19' \rightarrow R \rightarrow B2$.

Эффект сверхэластичности реализуется при деформировании никелида титана в температурном интервале прямого при нагружении и обратного при разгрузке мартенситного превращений. Как правило, на зависимости механического напряжения σ от деформации ϵ наблюдается сверхэластичная петля, свидетельствующая, что траектория прямого и обратного превращений не совпадают. Если при нагружении наблюдается накопление деформации, то при разгрузке происходит ее возврат.

Эффект памяти формы реализуется при деформировании никелида титана в мартенситном состоянии, то есть в состоянии, когда структурное состояние определяется фазой $B19'$. Величина деформации велика и может достигать 10% и более. В этом случае при разгрузке возврата этой деформации нет, но если материал нагревать в интервале обратного превращения, то будет наблюдаться возврат деформации, то есть реализуется эффект памяти формы. На фиг. 1 представлены проявления сверхэластичности (фиг. 1а,б) и эффект памяти формы (фиг. 1в).

Оба эффекта наблюдаются при низких значениях механических напряжений, что обусловлено аномально низкими упругими модулями. Низкие модули определяют низкую величину напряжения мартенситного сдвига, то есть величину механического напряжения, приложение которого обеспечивает зарождение и рост мартенситных кристаллов и их ориентацию относительно оси нагружения.

Пример 2. При совершении цикла нагрев-охлаждения в никелиде титана, например, в сплаве $Ti_{50}Ni_{49.9}Mo_{0.1}$ в интервале температур, содержащем интервал обратимых термоупругих мартенситных превращений $B2 \rightarrow B19'$ и $B19' \rightarrow B2$ ($B2$ - высокотемпературная фаза никелида титана, имеющая объемцентрированную кубическую решетку, $B19'$ - ромбический мартенсит с моноклинным искажением решетки) наблюдается акустическая эмиссия как показано на фиг. 2. Регистрацию и анализ сигналов акустической эмиссии осуществляли с помощью установки, блок-схема которой приведена на фиг. 3.

Акустическая эмиссия, регистрируемая в цикле превращений, существенно асимметрична. Среднеквадратичное напряжение акустической эмиссии при прямом превращении (при охлаждении от 150°C до комнатной температуры), на порядки величины превосходит этот параметр, регистрируемый при обратном превращении (при нагреве от комнатной температуры до 150°C).

Таким образом, если анализировать акустическую эмиссию, например, при охлаждении сплава, то за один эксперимент, можно получить данные о кинетике превращения или модулях упругости.

Пример 3. После проведения цикла превращений как в примере 2 проанализируем спектр сигналов акустической эмиссии, продуцируемых при прямых мартенситных превращениях в сплаве ТН-1В. Сплав ТН-1В содержал 50,5 ат. % титана, остальное никель и небольшие добавки железа и молибдена (не более 0,3 ат. % каждого). Зарегистрированные в цикле нагрев-охлаждение образцов из сплава ТН-1В с помощью программы «Регистратор данных АЦП» (dotScope) [5] компьютера экспериментальной

установки сигналы акустической эмиссии были проанализированы с помощью быстрого Фурье- преобразования. Регистрация сигналов акустической эмиссии осуществлялась выборками по 33000 точкам за один опрос. Задержка между опросами составляла около 100 миллисекунд. На фиг. 4 приведен спектральный состав потока сигналов акустической эмиссии в ходе прямого мартенситного превращения в исследуемом сплаве.

Как следует из данных фиг. 4 в основном спектральная плотность мощности сигналов акустической эмиссии сосредоточена ниже 100 кГц и представляет собой совокупность острых резонансных пиков.

Выделим из всего спектра только низкочастотную область (фиг. 5). Низкочастотный спектр акустической эмиссии представляет собой совокупность узких спектральных линий высокой амплитуды. Очевидно, что они являются резонансным откликом естественных резонаторов системы образец-волновод на колебательное воздействие волновых пакетов первичных сигналов акустической эмиссии. То есть низкочастотная область спектра связана с преобразованием первичных сигналов акустической эмиссии на естественных макроскопических резонаторах, представляющих собой систему образец-волновод. Такое преобразование возможно, если на резонаторе формируется стоячие волны, геометрические размеры L которых и длина волны λ связаны соотношением

$$L=k(\lambda/2).$$

Волновод представляет собой стальной стержень диаметром 4 мм и длиной 400 мм, образец - балочка из никелида титана (сплав ТН-1В) сечением 3×3 мм и длиной 30 мм. Длина волны определялась по частоте (периоду) соответствующего резонанса и скорости распространения звука в никелиде титана. Продольная и поперечная скорости звука в никелиде титана при плотности $6,44 \pm 0,1$ г/см³ и при температуре 20°С составляют 4660 м/с и 1940 м/с соответственно.

Анализ геометрии резонаторов системы образец-волновод позволяет выделить резонансы, сформированные в образце из сплава ТН-1В сечением 3×3 мм и длиной 30 мм. Очевидно, частота этих резонансов лежит в диапазоне 80-95 кГц (фиг. 6).

Анализ спектральной области 80-95 кГц основного максимума свидетельствует, о смещении одних и тех же спектральных линий в низкочастотную область в ходе проведения нескольких циклов термоупругих мартенситных превращений (фиг. 7).

Снижение частоты резонансов при неизменной геометрии резонатора, связано со снижением скорости упругих волн (продольных и поперечных) в никелиде титана и обусловлено стабилизацией некоторого объема мартенситных кристаллов, то есть в каждом цикле в образце никелида титана накапливается некоторая доля мартенситной фазы. В этой связи и наблюдается снижение скоростей упругих волн. Например, в сплаве Ni-49,5 ат. % Ni при 150°С скорость поперечных волн составляет около 1650 м/с, при температуре M_H - 1520 м/с, при температуре M_K - 1140 м/с (температуры M_H и M_K температуры начала и окончания превращений при охлаждении) [7]. Очевидно, такое снижение скорости упругих (акустических) волн обусловлено аномальным снижением упругих модулей в никелиде титана при охлаждении. Известно также, что при достижении температурного интервала $M_H - M_K$ температурное изменение упругого модуля $C_{44} \Delta C_{44} / \Delta T$ составляет 0,40-0,43 ГПа/град. [7].

Таким образом, выделенные низкочастотные спектральные линии в диапазоне 80-95 кГц, связанные с геометрией образца, их смещение позволяют контролировать структурное состояние никелида титана при циклировании термоупругих мартенситных

превращений и определять упругие модули.

Пример 4. Как и в примерах 2 и 3 провели цикл термоупругих мартенситных превращений в сплаве ТН-1В с одновременной регистрацией потока сигналов акустической эмиссии в ходе прямого мартенситного превращения, то есть при
5 охлаждении от 200°C до комнатной температуры. С помощью подпрограммы «Визуализатор динамики спектра» [6] программы «Регистратора данных АЦП» [5] осуществили непрерывную фиксацию изменения частотного спектра потока сигналов акустической эмиссии. На фиг. 7. представлены результаты обработки спектра сигналов акустической эмиссии в частотных диапазонах 60-80 кГц и 120-140 кГц.

Приведенные данные свидетельствуют о снижении характерных спектральных линий от 138-132 до 124-126 кГц при охлаждении в температурном интервале превращений от 140°C до 50°C. Кроме того, из приведенных данных следует, что снижение частот резонансных линий наблюдается задолго до начала мартенситного превращения, но особенно заметное снижение наблюдается в окрестности температурной точки начала
15 мартенситного превращения. Дискретный характер спектра сигналов акустической эмиссии свидетельствует о резонансных свойствах кристаллической среды, в которой распространяются волновые пакеты акустической эмиссии, а резонансные свойства определяются совокупностью естественных резонаторов системы образец-волновод-датчик. На этих резонаторах происходит преобразование первичных волновых пакетов
20 акустической эмиссии в стоячие волны, совокупность которых представляет собой поле стоячих продольных и сдвиговых волн. Более подробно смещение спектральных линий в зависимости от температуры представлено на фиг. 8. На фиг. 8 показано снижение четырех характерных спектральных линий, появление которых связано с резонаторами именно на образце никелида титана.

Так как на фиг. 7 наблюдается более 4 спектральных линий, то в табл. 1 приведены частоты всех этих линий для температур начала и конца превращений. Из данных рисунка 8 и табл. 1 следует, что при термоупругих мартенситных превращениях в никелиде титана резонансные частоты резонаторов могут смещаться на величину более 10 кГц, то есть на 7-10%.

Таблица 1. Частоты спектральных линий акустической эмиссии в начале и в конце термоупругого мартенситного превращения в никелиде титана, кГц

N\п	1	2	3	4	5	6
I ($\approx 140^\circ\text{C}$)	138,5	135,7	133,4	130,7	106,8	58,3
II ($\approx 60^\circ\text{C}$)	127,0	125,4	-	124,3	95,8	50,5

При превращении В2→В19' кроме трансформации кристаллической ОЦК-решетки В2 фазы в моноклинную В19' наблюдается аномальное снижение упругих модулей [3,4].

Относительное изменение упругих модулей $C'=(C_{11}-C_{12})/2$ и C_{44} в температурном интервале $M_H - M_K$ в зависимости от состава сплава может достигать 42 и 67% соответственно [7]. Согласно выражению для скорости сдвиговой волны, в кристалле $V=(C_{44}/\rho)^{1/2}$, где ρ - плотность, ее величина пропорциональна модулю сдвига, можно
45 заключить, что снижение упругих модулей приводит к снижению скоростей распространения сдвиговых волн в никелиде титана в ходе мартенситных превращений, следствием чего является снижение резонансных частот стоячих волн в образце, то есть смещение спектральных линий к низким частотам.

Таким образом, смещение спектральных линий в область низких частот обусловлено аномальным снижением упругих модулей в никелиде титана и соответственно снижением скоростей упругих продольных и поперечных волн. Узкие спектральные линии свидетельствуют о формировании стоячих волн, то есть низкочастотный спектр акустической эмиссии есть вторичный эффект, результат преобразования первичных акустических сигналов на системе естественных резонаторах образца. По смещению (снижению частот) характерных спектральных линий акустической эмиссии мы определяем смещение длин стоячих волн в образце, а по смещению длин стоячих волн и известной плотности никелида титана определяем снижение скоростей акустических волн, что позволяет определить смещение (снижение) упругих модулей. Кроме того, по смещению спектральных линий контролируют структурное состояние сплава и кинетику превращения. Снижение характерных частот свидетельствует о накоплении в структуре мартенситной фазы B19', а исчезновение спектральной линии 3 при охлаждении ниже 80°C свидетельствует о деградации характерного резонатора в никелиде титана. Очевидно, это связано с существенным снижением концентрации B2 фазы, претерпевающей превращение в B19' мартенсит.

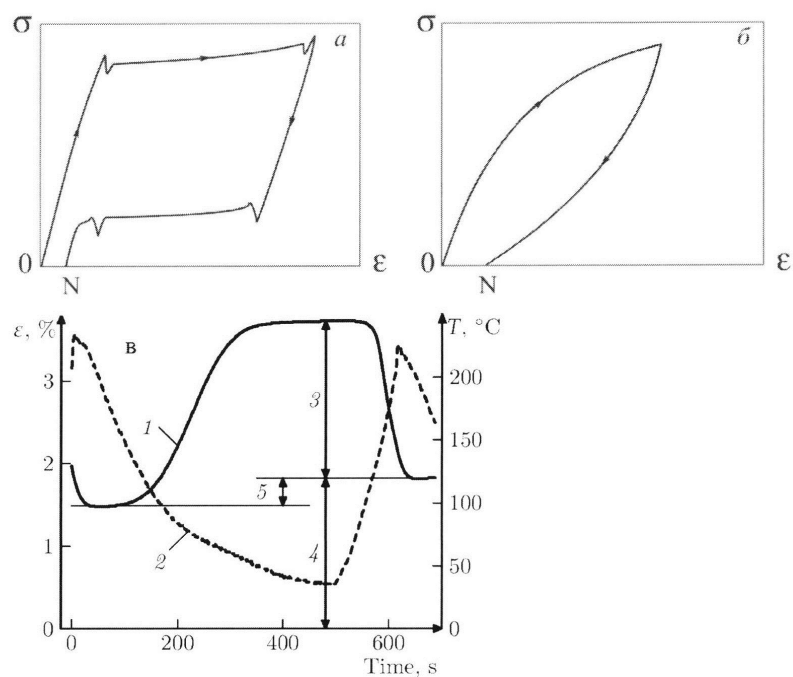
Литература

1. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике. - М.: Изд-во Иностранной литературы, 1957. - 726 с.
2. У. Вустер. Применение тензоров и теории групп для описания физических свойств кристаллов. - М: Изд-во Мир, 1977. - 383 с.
3. Лотков А.И., Кузнецов А.В. Упругие свойства монокристаллов Ti-Ni при мартенситными превращениями B2B19' и B2RB19' // ФММ. 1988. Т. 66. №5. С. 903-909.
4. Хачин В.Н., Муслов С.А., Пушин В.Г., Чумляков Ю.И. Аномалии упругих свойств монокристаллов TiNi-TiFe // ДАН СССР. 1987. Т. 295. №3. С. 606-609.
5. Регистратор данных АЦП (dotScope): свид. гос. рег. прогр. ЭВМ №2008612034 / В.А. Плотников, А.С. Грязнов; заявитель и правообладатель Алтайский государственный университет. - №2008610809; заявл. 28.02.08 опублик. 23.04.2008.
6. Визуализатор динамики спектра: свид. гос. рег. прогр. ЭВМ № / В.А. Плотников, А.С. Грязнов; заявитель и правообладатель Алтайский государственный университет. - №2017617201; заявл. 04.05.2017 опублик. 03.07.2017.
7. Плотников В.А. Акустическая диссипация энергии при термоупругих мартенситных превращениях в сплавах на основе никелида титана. Барнаул: Изд-во Алт. гос. ун-та, 2013, 210 с.

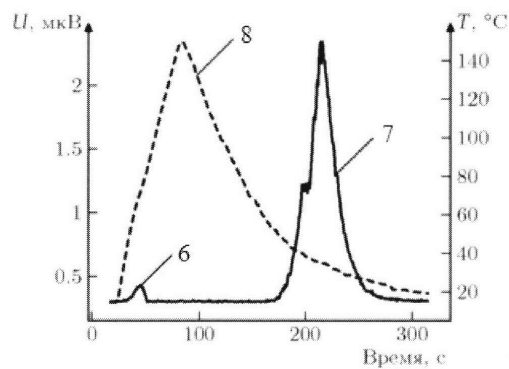
(57) Формула изобретения

Способ контроля структурного состояния сплавов на основе никелида титана при охлаждении сплава в температурном интервале, содержащем интервал превращений, отличающийся тем, что в цикле термоупругих мартенситных превращений в никелиде титана регистрируют поток сигналов акустической эмиссии, проводят спектральный анализ, фиксируют снижение характерных спектральных линий от 138-132 до 124-126 кГц при охлаждении в температурном интервале превращений от 140°C до 50°C и по окончании снижения характерных спектральных линий определяют структурное состояние как мартенситное.

1

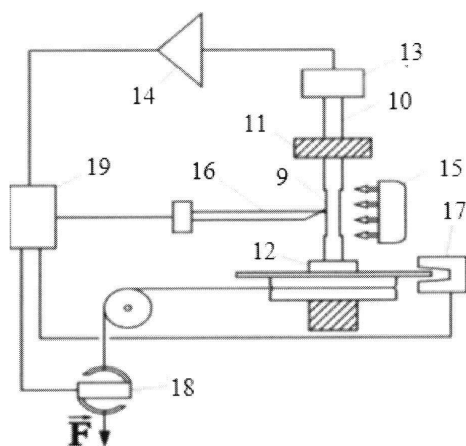


Фиг. 1 Эффект сверхэластичности (а,б) и памяти формы (в) в никелиде титана. 1 – накопление деформации при охлаждении и возврат деформации при нагреве, 2 – температура в цикле охлаждение-нагрев образца, 3 – величина обратимой деформации в цикле, 4 величина остаточной деформации, накопленной в серии циклов, 5- остаточная деформация в цикле.

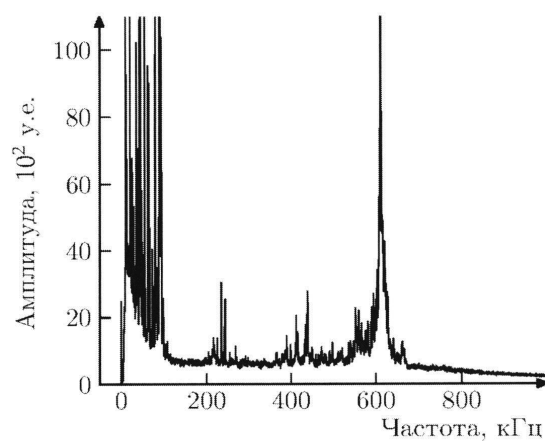


Фиг. 2 Акустическая эмиссия в цикле термоупругих мартенситных превращений в сплаве $\text{Ti}_{50}\text{Ni}_{49.9}\text{Mo}_{0.1}$: 6, 7 - зависимость среднеквадратичного напряжения акустической эмиссии от времени при прямом (7) и обратном (6) превращениях; 8 – температура в цикле нагрев-охлаждение.

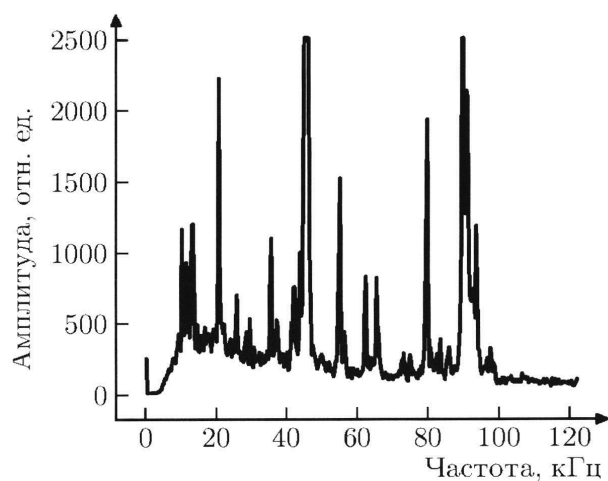
2



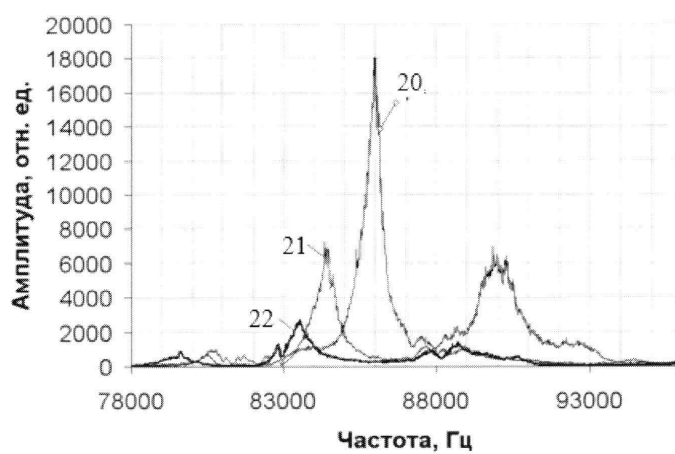
Фиг. 3 Блок-схемы экспериментальных установок: 9 - образец, 10 - волновод, 11 - неподвижный держатель, 12 - подвижный держатель, 13 - пьезодатчик с предварительным усилителем, 14 - усилитель, 15 - нагреватель, 16 - термопара, 17 - датчик деформации, 18 - датчик нагружения, 19 - аналого-цифровой преобразователь, компьютер.



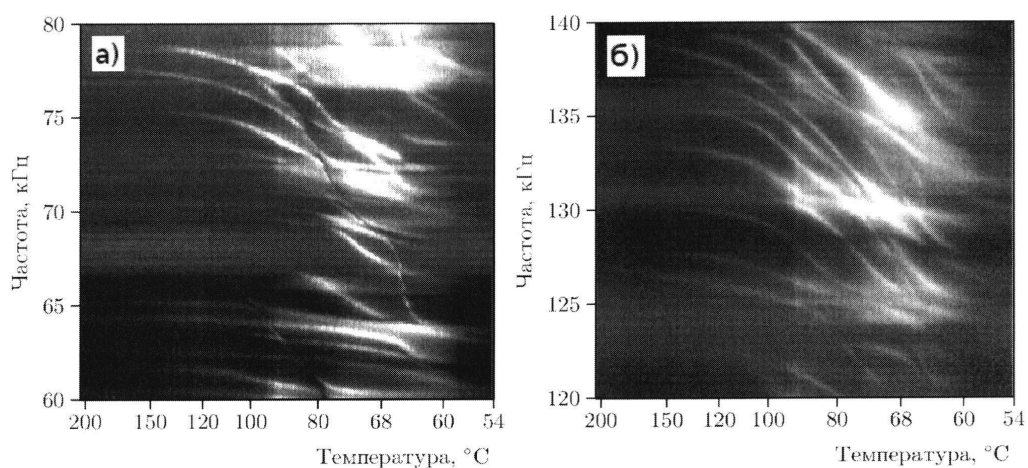
Фиг. 4 Частотный спектр сигналов акустической эмиссии в системе образец – волновод в ходе превращения B2→B19'.



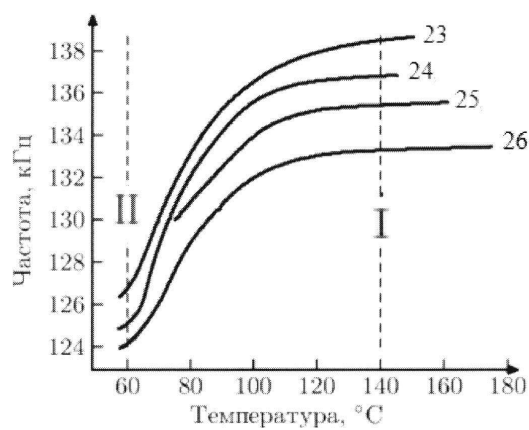
Фиг. 5 Низкочастотная область спектра потока сигналов акустической эмиссии в ходе прямого мартенситного превращения $B2 \rightarrow B19'$ в никелиде титана.



Фиг. 6 Резонансы, сформированные в образце никелида титана: 20, 21, 22 – номер цикла термоупругих мартенситных превращений.



Фиг. 7 Динамика спектральных линий сигналов акустической эмиссии в ходе термоупруго мартенситного превращения в никелиде титана в интервалах: а) – 60-80 кГц, б) – 120-140 кГц.



Фиг. 8 Зависимость смещения спектральных линий (23, 24, 25, 26) от температуры: I – спектральные линии около температуры начала превращения B2→B19'; II – спектральные линии около температуры конца превращения B2→B19'.