



УКРАЇНА

(19) UA

(11) 85384

(13) C2

(51) МПК (2009)

C22C 14/00

C22C 19/00

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ

ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

(54) СПОСІБ ОБРОБКИ НІКЕЛЬ-ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ З ПАМ'ЯТТЮ ФОРМИ

1

2

(21) а200511376

(22) 07.04.2004

(24) 26.01.2009

(86) РСТ/US2004/010758, 07.04.2004

(31) 10/427,783

(32) 01.05.2003

(33) US

(46) 26.01.2009, Бюл.№ 2, 2009 р.

(72) ВОЙЦИК КРЕЙГ

(73) ЕЙ ТІ АЙ ПРОПЕРТІЗ, ІНК.

(56) US 5882444 А, 16.03.1999

US 2002185200 А1, 12.12.2002

(57) 1. Спосіб обробки нікель-титанового сплаву, що містить від більше 50 до 55 ат. % нікелю, для забезпечення бажаної температури перетворення аустеніту, який включає:
вибір бажаної температури перетворення аустеніту, і

термічну обробку нікель-титанового сплаву для коректування кількості нікелю у твердому розчині в TiNi фазі і досягнення стабільної температури перетворення аустеніту для нікель-титанового сплаву, де стабільна температура перетворення аустеніту по суті дорівнює бажаній температурі перетворення аустеніту, причому нікель-титановий сплав містить достатньо нікелю для досягнення межі розчинності у твердому стані під час термічної обробки нікель-титанового сплаву.

2. Спосіб за п. 1, в якому бажана температура перетворення аустеніту знаходиться у межах від – 100 °С до 100 °С.

3. Спосіб за п. 1, в якому після термічної обробки нікель-титанового сплаву стабільна температура перетворення аустеніту нікель-титанового сплаву є незалежною від загального складу нікель-титанового сплаву.

4. Спосіб за п. 1, в якому термічна обробка нікель-титанового сплаву включає ізотермічне старіння нікель-титанового сплаву.

5. Спосіб за п. 4, в якому нікель-титановий сплав піддають ізотермічному старінню при температурі 500-800 °С.

6. Спосіб за п. 1, в якому термічна обробка нікель-титанового сплаву включає ізотермічне старіння нікель-титанового сплаву протягом щонайменше 2 годин.

7. Спосіб за п. 1, в якому термічна обробка нікель-титанового сплаву включає ізотермічне старіння нікель-титанового сплаву протягом щонайменше 24 годин.

8. Спосіб за п. 1, в якому термічна обробка нікель-титанового сплаву включає старіння нікель-титанового сплаву при першій температурі старіння і потім старіння нікель-титанового сплаву при другій температурі старіння, причому перша температура старіння вища від другої температури старіння.

9. Спосіб за п. 8, в якому перша температура старіння знаходиться в межах від 600 °С до 800 °С, і друга температура старіння знаходиться в межах від 500 °С до 600 °С.

10. Спосіб за п. 8, в якому нікель-титановий сплав досягає стабільної температури перетворення аустеніту під час старіння при другій температурі старіння.

11. Спосіб за п. 1, в якому термічна обробка нікель-титанового сплаву включає старіння нікель-титанового сплаву при першій температурі старіння і потім старіння нікель-титанового сплаву при другій температурі старіння, причому перша температура старіння нижча від другої температури старіння.

12. Спосіб за п. 11, в якому перша температура старіння знаходиться в межах від 500 °С до 600 °С, і друга температура старіння знаходиться в межах від 600 °С до 800 °С.

13. Спосіб за п. 11, в якому нікель-титановий сплав досягає стабільної температури перетворення аустеніту під час старіння при другій температурі старіння.

14. Спосіб за п. 1, в якому нікель-титановий сплав є бінарним нікель-титановим сплавом.

15. Спосіб за п. 1, в якому нікель-титановий сплав додатково містить щонайменше один додатковий легуючий елемент.

16. Спосіб за п. 15, в якому щонайменше один додатковий легуючий елемент вибирають з групи, яка складається з міді, заліза і гафнію.

17. Спосіб обробки щонайменше двох нікель-титанових сплавів з різними складами, що містять від більше 50 до 55 ат. % нікелю, для досягнення бажаної температури перетворення аустеніту, який включає:

(13) C2

(11) 85384

(19) UA

вибір бажаної температури перетворення аустеніту, піддавання нікель-титанових сплавів аналогічній термічній обробці до досягнення стабільних температур перетворення аустеніту в кожному сплаві, стабільні температури перетворення аустеніту по суті дорівнюють бажаній температурі перетворення аустеніту,

причому кожний з щонайменше двох нікель-титанових сплавів містить достатньо нікелю для досягнення межі розчинності у твердому стані під час термічної обробки нікель-титанових сплавів.

18. Спосіб за п. 17, в якому термічна обробка щонайменше двох нікель-титанових сплавів включає ізотермічне старіння щонайменше двох нікель-титанових сплавів.

19. Спосіб за п. 17, в якому термічна обробка щонайменше двох нікель-титанових сплавів включає старіння щонайменше двох нікель-титанових сплавів при першій температурі старіння і потім старіння щонайменше двох нікель-титанових сплавів при другій температурі старіння, причому перша температура старіння вища від другої температури старіння.

20. Спосіб за п. 17, в якому щонайменше два нікель-титанових сплави досягають стабільної температури перетворення аустеніту під час старіння при другій температурі старіння.

21. Спосіб за п. 17, в якому термічна обробка щонайменше двох нікель-титанових сплавів включає старіння щонайменше двох нікель-титанових сплавів при першій температурі старіння і потім старіння щонайменше двох нікель-титанових сплавів при другій температурі старіння, причому перша температура старіння нижча від другої температури старіння.

22. Спосіб за п. 21, в якому щонайменше два нікель-титанових сплави досягають стабільної температури перетворення аустеніту під час старіння при другій температурі старіння.

23. Спосіб обробки нікель-титанового сплаву, який включає області змінюваного складу, що містить від більше 50 до 55 ат. % нікелю, таким чином, що кожна область має бажану температуру перетворення аустеніту, який включає:

термічну обробку нікель-титанового сплаву для коректування кількості нікелю в твердому розчині в TiNi фазі в кожній ділянці нікель-титанового сплаву і досягнення стабільної температури перетворення аустеніту в кожній ділянці, яка по суті дорівнює бажаній температурі перетворення аустеніту, причому нікель-титановий сплав містить достатньо нікелю для досягнення межі розчинності в твердому стані під час термічної обробки нікель-титанового сплаву.

24. Спосіб за п. 23, в якому термічна обробка нікель-титанового сплаву включає ізотермічне старіння нікель-титанового сплаву.

25. Спосіб за п. 23, в якому термічна обробка нікель-титанового сплаву включає старіння нікель-титанового сплаву при першій температурі старіння і потім старіння нікель-титанового сплаву при другій температурі старіння, причому перша температура старіння вище другої температури старіння.

26. Спосіб за п. 25, в якому нікель-титановий сплав досягає стабільної температури перетворення аустеніту під час старіння при другій температурі старіння.

27. Спосіб за п. 23, в якому термічна обробка нікель-титанового сплаву включає старіння нікель-титанового сплаву при першій температурі старіння і потім старіння нікель-титанового сплаву при другій температурі старіння, причому перша температура старіння нижча від другої температури старіння.

28. Спосіб за п. 27, в якому нікель-титановий сплав досягає стабільної температури перетворення аустеніту під час старіння при другій температурі старіння.

29. Спосіб обробки нікель-титанового сплаву, що містить від більше 50 до 55 ат. % нікелю, для досягнення бажаного інтервалу температур перетворення аустеніту, що включає ізотермічне старіння нікель-титанового сплаву в печі при температурі, що знаходиться в межах від 500 °C до 800 °C протягом щонайменше 2 годин, де після старіння нікель-титановий сплав має інтервал температур перетворення аустеніту не більше 15 °C, причому нікель-титановий сплав містить достатньо нікелю для досягнення межі розчинності в твердому стані під час термічної обробки нікель-титанового сплаву.

30. Спосіб за п. 29, в якому після старіння інтервал температур перетворення аустеніту складає не більше 10 °C.

31. Спосіб за п. 29, в якому після старіння інтервал температур перетворення аустеніту складає не більше 6 °C.

32. Спосіб за п. 29, в якому нікель-титановий сплав є бінарним нікель-титановим сплавом.

33. Спосіб за п. 29, в якому нікель-титановий сплав додатково містить щонайменше один додатковий легуючий елемент.

34. Спосіб за п. 33, в якому щонайменше один додатковий легуючий елемент вибирають з групи, яка складається з міді, заліза і гафнію.

35. Спосіб обробки нікель-титанового сплаву, який включає ділянки змінюваного складу, що містить від більше 50 до 55 ат. % нікелю, таким чином, що кожна ділянка має бажаний інтервал температур перетворення аустеніту, який включає:

ізотермічне старіння нікель-титанового сплаву для коректування кількості нікелю в твердому розчині в TiNi фазі в кожній ділянці нікель-титанового сплаву і досягнення інтервалу температур перетворення аустеніту не більше 15 °C для кожної вказаної ділянки,

причому нікель-титановий сплав містить достатньо нікелю для досягнення межі розчинності в твердому стані під час ізотермічного старіння нікель-титанового сплаву.

36. Спосіб за п. 35, в якому після старіння інтервал температур перетворення аустеніту складає не більше 10 °C.

37. Спосіб за п. 36, в якому після старіння інтервал температур перетворення аустеніту складає не більше 6 °C.

38. Спосіб обробки нікель-титанового сплаву, що містить від більше 50 до 55 ат. % нікелю, для до-

сягнення бажаного інтервалу температур перетворення аустеніту, який включає:

старіння нікель-титанового сплаву в печі при першій температурі старіння для досягнення стабільної температури перетворення аустеніту; і старіння нікель-титанового сплаву при другій температурі старіння, яка відрізняється від першої температури старіння для досягнення інтервалу температур перетворення аустеніту для нікель-титанового сплаву, який по суті дорівнює бажаному інтервалу температур перетворення, причому нікель-титановий сплав містить достатньо нікелю для досягнення межі розчинності в твердо-

му стані під час старіння нікель-титанового сплаву. 39. Спосіб за п. 38, в якому друга температура старіння нижча від першої температури старіння.

40. Спосіб за п. 38, в якому друга температура старіння вища від першої температури старіння.

41. Спосіб за п. 38, в якому інтервал температур перетворення аустеніту, досягнутий після старіння нікель-титанового сплаву при другій температурі старіння, більше інтервалу температур перетворення аустеніту, досягнутого після старіння нікель-титанового сплаву при першій температурі старіння.

Різні варіанти здійснення даного винаходу в основному відносяться до способів обробки нікель-титанових сплавів. Більш конкретно, певні варіанти здійснення даного винаходу відносяться до термічної обробки нікель-титанових сплавів для передбачуваного коректування температури перетворення аустеніту і/або інтервалу температур перетворення сплаву.

Відомо, що еквіатомні і майже еквіатомні нікель-титанові сплави володіють як властивістю «пам'яті форми», так і «супереластичними» властивостями. Більш конкретно, відомо, що ці сплави, які звичайно називаються сплавами «нітінол», піддають мартенситному перетворенню з початкової фази (яка звичайно називається аустенітною фазою) в, щонайменше, одну мартенситну фазу при охолодженні до температури нижче початкової мартенситної (або M_s) температури сплаву. Це перетворення є повним при охолодженні до кінцевої мартенситної (або M_f) температури сплаву. Додатково, перетворення є оборотним при нагріванні матеріалу до температури вище його кінцевої аустенітної (або A_f) температури. Це оборотне мартенситне перетворення викликає властивості запам'ятовування форми сплаву. Наприклад, нікель-титановий сплав може бути відформований в першу форму під час аустенітної фази (тобто вище кінцевої аустенітної, або A_f , температури сплаву) і потім охолоджений до температури нижче за M_f і сформований у другу форму. Доти, поки матеріал залишається нижчим за A_s сплаву (тобто температури, при якій починається перехід в аустеніт або початкової температури аустеніту), сплав буде зберігати другу форму. Однак якщо сплав нагрівають до температури понад A_f , то сплав буде повертатися до першої форми.

Перетворення між фазами аустеніту і мартенситу також викликає «супереластичні» властивості нікель-титанових сплавів. Коли нікель-титановий сплав деформують при температурі понад M_s , то сплав може зазнавати деформаційного перетворення з фази аустеніту в фазу мартенситу. Це перетворення, поєднане зі здатністю фази мартенситу деформуватися шляхом руху здвоєних меж без розмноження дислокацій, дозволяє нікель-титановому сплаву поглинати велику кількість енергії деформації шляхом пружної деформації без пластичного деформування (тобто надовго).

Коли напруження видаляють, сплав здатний майже повністю повернутися до його ненапруженого стану.

Можливість комерційно скористатися унікальними властивостями нікель-титанових сплавів і інших сплавів з пам'яттю форми значною мірою залежить від температур, при яких ці перетворення мають місце, тобто A_s і A_f , M_s і M_f сплаву, а також інтервалу температур, поблизу яких ці перетворення мають місце. Однак було помічено, що в бінарних системах нікель-титанового сплаву температури перетворення сплаву дуже залежать від складу. Тобто, наприклад, було помічено, що M_s температура нікель-титанового сплаву може змінюватися на більше 100K при зміні на 1 атомний процент в складі сплаву. Дивись К. Отцука (Otsuka) і Т. Какешиа (Kakeshia), "Science and Technology of Shape-Memory Alloys: New Developments", MRS Bulletin, лютий 2002 року, стор. 91-100.

Додатково, як буде зрозуміло фахівцям в цій галузі техніки, жорсткий контроль складу нікель-титанових сплавів, необхідний для досягнення передбачуваних температур перетворення, є надзвичайно важким для виконання. Наприклад, для того, щоб досягнути бажаної температури перетворення в типовому нікель-титановому сплаві після того, як відлитий злиток або заготовка, температура перетворення злитка повинна бути виміряна. Якщо температура перетворення не є бажаною температурою перетворення, то склад злитка повинен бути скоректований шляхом переплавлення і легування злитка. Додатково, якщо злиток композиційно сегрегований, що може мати місце, наприклад, під час затвердіння злитка, то температура перетворення декількох областей уперек злитка повинна бути виміряна, і температура перетворення в кожній області повинна бути скоректована. Цей процес повинен повторюватися доти, поки не досягнуть бажаної температури перетворення. Як буде зрозуміло фахівцям в цій галузі техніки, подібні способи регулювання температури перетворення шляхом регулювання складу є односторонньо трудомісткими і дорогими. Використовуваний в даному описі термін «температура(и) перетворення» відноситься в основному до будь-якої з температур перетворення, обговорених вище, тоді як термін «температура(и) перетворення аус-

теніту» відноситься до, щонайменше, однієї з аустенітної початкової (A_c) або аустенітної кінцевої (A_f) температури сплаву, якщо не указано конкретно.

Способи загальноприйнятого підвищення або зниження температур перетворення нікель-титанового сплаву з використанням термічних процесів відомі в даній галузі техніки. Наприклад, патент США №5882444 (Flomenblit et. al.) розкриває обробку запам'ятовування для двостороннього сплаву з пам'яттю форми, яка включає формування нікель-титанового сплаву в форму, прийняту в аустенітній фазі, і потім полігонізацію сплаву шляхом нагрівання при 450°C - 550°C протягом від 0,5 до 2 годин, обробку сплаву розчином при 600°C - 800°C протягом від 2 до 50 хвилин і, нарешті, старіння при приблизно 350°C - 500°C протягом від приблизно 0 до 2,5 годин. Згідно з (Flomenblit et. al.) після цієї обробки сплав повинен мати A_f , що знаходиться в межах 10°C - 60°C , і інтервал температур перетворення (тобто A_f - A_c) - від 1 до 5°C . Потім A_f сплаву може бути підвищена шляхом старіння сплаву при температурі приблизно 350°C - 500°C . Альтернативно, сплав може бути оброблений розчином при температурі приблизно 510°C - 800°C для зниження A_f сплаву. Дивись (Flomenblit et. al.), в графі 3, рядки 47-53.

Патент США №5843244 (Pelton et. al.) розкриває спосіб обробки деталі, відформованої з нікель-титанового сплаву, для зниження A_f сплаву шляхом витримування деталі до температури більшої тієї, до якої витримують сплав фіксованої форми, і меншої температури розчинення надмірної фази сплаву протягом більше 10 хвилин для зменшення A_f сплаву.

Однак залишається необхідність в ефективному способі передбачуваного регулювання температур перетворення аустеніту і/або інтервалу температур перетворення аустеніту нікель-титанових сплавів для досягнення бажаної температури перетворення аустеніту і/або інтервалу температур перетворення аустеніту. Додатково, залишається необхідність в способі передбачуваного регулювання температур перетворення аустеніту і інтервалу температур перетворення аустеніту нікель-титанових сплавів, що мають змінювані вмісти нікелю.

Варіанти здійснення даного винаходу пропонують способи обробки нікель-титанових сплавів для досягнення бажаної температури перетворення аустеніту. Наприклад, один необмежувальний спосіб обробки нікель-титанового сплаву, що містить від більше 50 аж до 55% нікелю, для забезпечення бажаної температури перетворення аустеніту включає вибір бажаної температури перетворення аустеніту і термічну обробку нікель-титанового сплаву для коректування кількості нікелю в твердому розчині в TiNi фазі сплаву таким чином, що стабільна температура перетворення аустеніту досягається під час термічної обробки нікель-титанового сплаву, при цьому стабільна температура перетворення аустеніту по суті дорівнює бажаній температурі перетворення аустеніту.

Інший необмежувальний спосіб обробки нікель-титанового сплаву для забезпечення бажаної

температури перетворення аустеніту включає вибір нікель-титанового сплаву, що містить від більше 50 аж до 55% нікелю, вибір бажаної температури перетворення аустеніту і термічну обробку вибраного нікель-титанового сплаву для коректування кількості нікелю в твердому розчині в TiNi фазі сплаву таким чином, що стабільна температура перетворення аустеніту досягається під час термічної обробки вибраного нікель-титанового сплаву, причому стабільна температура перетворення аустеніту по суті дорівнює бажаній температурі перетворення аустеніту, при цьому вибраний нікель-титановий сплав містить достатньо нікелю для досягнення межі розчинності в твердому стані під час термічної обробки вибраного нікель-титанового сплаву.

Крім того, інший необмежувальний спосіб обробки двох або більшої кількості нікель-титанових сплавів, що мають змінювані склади, які містять від більше 50 аж до 55% нікелю, для досягнення бажаної температури перетворення аустеніту включає вибір бажаної температури перетворення аустеніту і піддавання нікель-титанових сплавів подібній термічній обробці таким чином, що після термічної обробки нікель-титанові сплави мають стабільні температури перетворення аустеніту, причому стабільні температури перетворення аустеніту по суті дорівнюють бажаній температурі перетворення аустеніту.

Інший необмежувальний спосіб обробки нікель-титанового сплаву, що включає області змінюваного складу, який містить від більше 50 аж до 55% нікелю, так що кожна область має бажану температуру перетворення аустеніту, включає термічну обробку нікель-титанового сплаву для коректування кількості нікелю в твердому розчині в TiNi фазі сплаву в кожній області нікель-титанового сплаву, при цьому після термічної обробки нікель-титанового сплаву кожна з областей нікель-титанового сплаву має стабільну температуру перетворення аустеніту, яка по суті дорівнює бажаній температурі перетворення аустеніту.

Варіанти здійснення даного винаходу також пропонують способи обробки нікель-титанового сплаву для досягнення бажаного температурного інтервалу перетворення аустеніту. Наприклад, один необмежувальний спосіб обробки нікель-титанового сплаву, що містить від більше 50 аж до 55% нікелю, для досягнення бажаного інтервалу температур перетворення аустеніту включає ізотермічне старіння нікель-титанового сплаву в печі при температурі в межах від 500°C до 800°C протягом, щонайменше, 2 годин, при цьому, після старіння нікель-титановий сплав має інтервал температур перетворення аустеніту не більше 15°C .

Інший необмежувальний спосіб обробки нікель-титанового сплаву, що включає області зі змінюваним складом, який містить від більше 50 аж до 55% нікелю таким чином, що кожна область має бажаний інтервал температур, включає ізотермічне старіння нікель-титанового сплаву для коректування кількості нікелю в твердому розчині в TiNi фазі сплаву в кожній області нікель-титанового сплаву, при цьому, після ізотермічного старіння нікель-титанового сплаву кожна з облас-

тей нікель-титанового сплаву має інтервал температур перетворення аустеніту не більше 15°C.

Крім того, інший необмежувальний спосіб обробки нікель-титанового сплаву, який містить від більше 50 до 55% нікелю, для досягнення бажаного інтервалу температур перетворення аустеніту включає ізотермічне старіння нікель-титанового сплаву в печі при першій температурі старіння для досягнення стабільної температури перетворення аустеніту і ізотермічне старіння нікель-титанового сплаву при другій температурі старіння, яка відрізняється від першої температури старіння, при цьому, після старіння при другій температурі старіння нікель-титановий сплав має інтервал температур перетворення аустеніту, який по суті дорівнює бажаному температурному інтервалу перетворення аустеніту.

Різні варіанти здійснення даного винаходу будуть краще зрозумілі при читанні в поєднанні з рисунками, в яких

Фігура 1 є графічною залежністю: «температура перетворення аустеніту - час старіння» при температурі 675°C для двох різних нікель-титанових сплавів.

Фігура 2 є графічною залежністю: «стабільна температура перетворення аустеніту - температура старіння» для двох різних нікель-титанових сплавів.

Фігура 3 є графічною залежністю: «температура перетворення аустеніту - час старіння» при 566°C для двох різних нікель-титанових сплавів.

Фігура 4 є кривою диференціальною скануючої калориметрії (DSC) нікель-титанового сплаву після 2 годин старіння при 650°C.

Фігура 5 є кривою DSC нікель-титанового сплаву після 24 годин старіння при 650°C.

Фігура 6 є кривою DSC нікель-титанового сплаву після 216 годин старіння при 650°C.

Як обговорено попередньо, температури перетворення аустеніту більшої частини нікель-титанових сплавів звичайно коректують шляхом коректування складу сплаву. Однак, оскільки температури перетворення аустеніту нікель-титанових сплавів є чутливими до незначних композиційних змін, то спроби регулювання температур перетворення аустеніту через склад довели їх трудомісткість і дорожнечу. Більш того при цьому маса сплаву є композиційно сегрегованою, що може мати місце, наприклад, під час затвердіння, коректування температур перетворення аустеніту сплаву може вимагати численних композиційних коректувань. Навпаки, способи обробки нікель-титанових сплавів згідно з різними варіантами здійснення даного винаходу можуть бути вигідні для забезпечення ефективних способів передбачуваного регулювання температур перетворення аустеніту і/або інтервалу температур перетворення аустеніту нікель-титанових сплавів для досягнення бажаної температури перетворення аустеніту і/або інтервалу температур перетворення аустеніту без необхідності композиційних коректувань. Додатково, способи згідно з різними варіантами здійснення даного винаходу можуть бути вигідними для забезпечення ефективних способів передбачуваного регулювання температур пере-

творення аустеніту і/або інтервалу температур перетворення аустеніту для нікель-титанових сплавів зі змінюваними вмістами нікелю, наприклад, якщо велика частина сплаву композиційно сегрегована, або де різні сплави обробляються одночасно. Інші переваги способів обробки нікель-титанових сплавів згідно з певними варіантами здійснення даного винаходу можуть включати поліпшені властивості відносно міцності на розтягнення і твердість сплавів.

Буде зрозуміло фахівцям в цій галузі техніки, що A_s і A_f нікель-титанових сплавів в основному можна коректувати шляхом впливу на нікель-титановий сплав підвищеної температури протягом відносно коротких періодів часу. Наприклад, якщо сплав піддають впливу температури, достатньої щоб спричинити утворення осадів, багатих нікелем, то температури перетворення сплаву звичайно будуть підвищуватися. Навпаки, якщо сплав піддають впливу температури, достатньої щоб спричинити розчинення осадів, багатих нікелем (тобто нікель переходить в твердий розчин в TiNi фазу), то температура перетворення сплаву звичайно буде знижуватися.

Однак було виявлено, що ступінь підвищення або зниження температур перетворення аустеніту під час термічної обробки буде залежати від декількох чинників, що включають, але не як обмеження, початкові A_s і A_f сплаву, загальний склад сплаву, а також час і температуру, впливу якої він зазнає. Наприклад, звернемося тепер до фігури 1, де показана графічна залежність «температура перетворення аустеніту (A_s і A_f) - час старіння» при 675°C для двох нікель-титанових сплавів, одного, який містить 55% нікелю (зображеного темними кружками і квадратами), і іншого, який містить 52% нікелю (зображеного світлими кружками і квадратами). Як видно з графічної залежності на фігурі 1, при старінні цих сплавів протягом 2 годин, A_s і A_f для обох сплавів змінюються істотно із збільшенням часу старіння. Однак після 24 годин старіння зміни в A_s (зображені на фігурі 1 квадратами) і A_f (зображені на фігурі 1 кружальцями) для обох сплавів із збільшенням часу старіння є відносно маленькими. Наприклад, після 216 годин старіння температури перетворення аустеніту тільки трохи відхиляються від температур перетворення аустеніту, що спостерігаються після 24 годин старіння. Іншими словами, виявляється, що після старіння цих сплавів при 675°C протягом 24 годин досягаються стабільні температури перетворення аустеніту (як A_s , так і A_f). Використовуваний в даному описі термін "стабільна температура перетворення аустеніту" означає, що, щонайменше, одна з аустенітної початкової (A_s) і аустенітної кінцевої (A_f) температур нікель-титанового сплаву, отриманого після термічної обробки, відхиляється не більше ніж на 10°C при термічній обробці нікель-титанового сплаву в тих же умовах протягом додаткових 8 годин.

Наприклад, хоча тут не як обмеження, після старіння сплаву з 55 атомними (ат.) процентами нікелю (55% ат. Ni) при 675°C протягом 24 годин нікель-титановий сплав має A_s приблизно -12°C і сплав з 52 атомними процентами нікелю (52% ат.

Ni) має A_6 приблизно -18°C . Після старіння сплаву з 55% ат. Ni при 675°C протягом 24 годин нікель-титановий сплав має A_4 приблизно -9°C і сплав з 52% ат. Ni має A_4 приблизно -14°C . Коли ці сплави старіють протягом 216 годин при 675°C , то ні A_6 , ні A_4 окремих сплавів не відхиляється більш ніж на 10°C від A_6 або A_4 сплавів, зареєстрованих після 24 годин старіння. У цьому конкретному необмежувальному прикладі A_6 і A_4 окремих сплавів після старіння протягом 216 годин при 675°C відхиляються на менше ніж приблизно 5°C від A_6 і A_4 сплавів, що спостерігаються після 24 годин старіння при 675°C .

Як обговорено нижче більш детально, і поки не маючи намір обмежуватися якою-небудь конкретною теорією, автор винаходу вважає, що мінливість A_6 і A_4 сплавів після старіння протягом 2 годин можна значною мірою приписати неможливості досягнути композиційної рівноваги або майже рівноважних умов в цих сплавах під час цієї, відносно короткочасної, термічної обробки. Таким чином, як можна бачити з графічної залежності на фігурі 1, в той час як нерівноважні термічні обробки можуть бути використані, в основному, для підвищення (або зниження) температури перетворення аустеніту сплаву, але вони не особливо корисні в здійсненні передбачуваних коректувань температури перетворення аустеніту сплаву для того, щоб досягнути бажаної температури перетворення аустеніту.

Звертаючись знову до фігури 1 можна бачити, що температури перетворення аустеніту сплавів залежать від складу при старінні сплавів протягом менше приблизно 24 годин. Наприклад, після 2 годин старіння при 675°C A_6 сплаву з 55% ат. Ni вище на приблизно 21°C , ніж A_6 сплаву з 52% ат. Ni; і A_4 сплаву з 55% ат. Ni вище на приблизно 30°C , ніж A_4 сплаву з 52% ат. Ni. Навіть після 6 годин старіння при 675°C A_6 сплаву з 55% ат. Ni вище на приблизно 19°C , ніж A_6 сплаву з 52% ат. Ni, в той час як A_4 сплаву з 55% ат. Ni вище на приблизно 30°C , ніж A_4 сплаву з 52% ат. Ni. Однак, після приблизно 24 годин старіння при 675°C різниця між A_6 сплаву з 55% ат. Ni і нею ж сплаву з 52% ат. Ni помітно зменшується, так само як і різниця між A_4 для обох сплавів. Хоч, не як обмеження, в цьому конкретному прикладі після 24 годин старіння при 675°C різниця між початковими температурами аустеніту двох сплавів складає тільки приблизно 6°C , тоді як різниця між кінцевими температурами аустеніту двох сплавів становить приблизно 5°C .

Таким чином виявляється, що температури перетворення аустеніту, досягнуті після старіння цих двох сплавів протягом приблизно 24 годин при 675°C є незалежними від загального складу сплаву. Використовуваний тут термін "незалежний від загального складу" означає, що, щонайменше, одна з початкової (A_6) або кінцевої (A_4) температур аустеніту нікель-титанового сплаву після термічної обробки знаходиться в межах 10°C для будь-якого іншого нікель-титанового сплаву, що аналогічним чином оброблений і має достатньо нікелю для досягнення межі розчинності в твердому стані під час термічної обробки, як обговорено нижче більш

детально.

Отже, як можна бачити з графічної залежності на фігурі 1, хоч можуть бути використані відносно короткочасні термічні обробки для створення істотних змін в температурах перетворення аустеніту нікель-титанових сплавів (тобто в основному, підвищення або зниження температур перетворення аустеніту), але вони не особливо корисні в здійсненні передбачуваних коректувань до температур перетворення аустеніту нікель-титанових сплавів для того, щоб досягнути бажаної температури перетворення аустеніту, яка є незалежною від загального складу сплаву.

Як обговорено попередньо, автор винаходу вважає, що мінливість, пов'язана з відносно короткочасними термічними обробками може бути значною мірою приписана нерівноважним умовам, досягнутим в сплаві під час термічної обробки. Однак було виявлено, що передбачувані і стабільні температури перетворення і, зокрема, температури перетворення аустеніту, можуть бути досягнуті шляхом термічної обробки нікель-титанових сплавів для досягнення композиційної рівноваги або майже рівноважного стану в сплаві. Більш конкретно, було виявлено, що нікель-титанові сплави можуть бути термічно оброблені для досягнення стабільної температури перетворення аустеніту, яка є ознакою температури, при якій матеріал є термічно обробленим, при умові, що нікель-титановий сплав має достатньо нікелю для досягнення межі розчинності нікелю в твердому стані (обговорено нижче) в TiNi фазі при температурі термічної обробки. Хоча, не маючи на увазі обмежитися якою-небудь конкретною теорією або обмежити даний винахід, вважають, що стабільні температури перетворення аустеніту, що спостерігаються після термічної обробки нікель-титанових сплавів при заданій температурі, є ознакою рівноважної або майже рівноважної кількості нікелю в твердому розчині в TiNi фазі при температурі термічної обробки.

Хоч, тут не як обмеження, буде визнано фахівцями в цій галузі техніки, що в бінарних нікель-титанових сплавах максимальна кількість нікелю, яка може існувати в стабільному твердому розчині в TiNi фазі, змінюється з температурою. Іншими словами, межа розчинності нікелю в твердому стані змінюється з температурою. Використовуваний тут термін "межа розчинності в твердому стані" означає максимальну кількість нікелю, яка залишається в TiNi фазі при даній температурі. Іншими словами, межа розчинності в твердому стані є рівноважною кількістю нікелю, яка може існувати в твердому розчині в TiNi фазі при даній температурі. Наприклад, не як обмеження в даному описі, як буде зрозуміло фахівцям в цій галузі техніки, звичайно межа розчинності нікелю в твердому стані в TiNi фазі задається кривою розчинності твердого розчину, що відділяє фазові області TiNi і TiNi + TiNi₃ в діаграмі фазової рівноваги Ti-Ni. Дивись ASM Materials Engineering Dictionary, J.R. Davis, ed. ASM International, 1992, стор. 432, що включено в опис за допомогою посилання. Необмежувальний приклад однієї TiNi фазової діаграми показаний в роботі K.Otsuka and T.Kakeshia на

стор. 96. Однак альтернативні способи визначення межі розчинності нікелю в твердому стані в TiNi фазі будуть очевидні фахівцям в цій галузі техніки.

Буде також зрозуміло фахівцям в цій галузі техніки, що, якщо кількість нікелю в TiNi фазі перевищує межу розчинності нікелю в твердому стані в TiNi фазі (тобто TiNi фаза є перенасиченою нікелем) при даній температурі, то нікель буде мати тенденцію до осадження з розчину з утворенням одного або більшої кількості осадів, збагачених нікелем, таким чином, знижуючи перенасичення. Однак оскільки швидкості дифузії в системі Ti-Ni можуть бути повільними, то перенасичення не знижується відразу. Замість цього може бути потрібен суттєвий час для досягнення рівноважних станів в сплаві. Навпаки, якщо кількість нікелю в TiNi фазі складає менша за межу розчинності в твердому стані при даній температурі, то нікель буде дифундувати в TiNi фазу доти, поки не буде досягнута межа розчинності в твердому стані. До того ж, буде потрібний суттєвий час для досягнення рівноважних станів в сплаві.

Додатково, коли нікель осаджується з TiNi фази, щоб утворити багаті нікелем осади, то як міцність, так і межа міцності на розтягнення сплаву можуть бути підвищені завдяки присутності нікелевих осадів, розподілених по всьому сплаву. На це підвищення міцності звичайно посилаються як на «зміцнення при старінні» або «дисперсійне твердіння». Дивись ASM Materials Engineering Dictionary, стор. 339.

Як обговорено попередньо, на температури перетворення нікель-титанового сплаву сильно впливає склад сплаву. Зокрема, було знайдено, що кількість нікелю в розчині в TiNi фазі нікель-титанового сплаву буде сильно впливати на температури перетворення сплаву. Наприклад, було знайдено, що M_s нікель-титанового сплаву буде звичайно знижуватися із збільшенням кількостей нікелю в твердому розчині в TiNi фазі сплаву, тоді як M_s нікель-титанового сплаву буде звичайно підвищуватися із зменшенням кількостей нікелю в твердому розчині в TiNi фазі сплаву. Дивись R.J. Wasilewski et al., "Homogeneity Range and the Martensitic Transformation in TiNi", Metallurgical Transactions, том 2, січень 1971 року, стор. 229-238.

Однак, хоч не маючи на увазі обмежитися якою-небудь конкретною теорією, автор винаходу вважає, що коли рівноважна або майже рівноважна кількість нікелю існує в твердому розчині в TiNi фазі нікель-титанового сплаву при даній температурі, то сплав буде мати стабільну температуру перетворення аустеніту, яка є ознакою даної температури, незважаючи на загальний склад сплаву. Іншими словами, оскільки достатньо нікелю присутньо в нікель-титановому сплаві, для досягнення межі розчинності нікелю в твердому стані в TiNi фазі сплаву при даній температурі термічної обробки, то всі нікель-титанові сплави повинні мати по суті таку ж температуру перетворення аустеніту після термічної обробки сплавів при конкретній температурі термічної обробки для досягнення рівноважної або майже рівноважної кількості нікелю в твердому розчині в TiNi фазі сплавів при те-

мпературі термічної обробки. Тому, стабільна температура перетворення аустеніту, досягнута після термічної обробки нікель-титанового сплаву, є ознакою рівноважної або майже рівноважної кількості нікелю в твердому розчині в TiNi фазі сплаву при конкретній температурі термічної обробки.

Отже, хоч тут не як обмеження, оскільки кількість нікелю в твердому розчині в TiNi фазі нікель-титанового сплаву досягає рівноважної кількості (тобто межі розчинності в твердому стані) при даній температурі, то температура перетворення аустеніту сплаву буде менше коливатися від додаткової термічної обробки при цій температурі. Іншими словами, буде спостерігатися стабільна температура перетворення аустеніту, яка є ознакою композиційного рівноважного або майже рівноважного стану в сплаві.

Буде зрозуміло фахівцям в цій галузі техніки, що, якщо після термічної обробки сплав охолоджують дуже повільно до кімнатної температури, то рівноважні або майже рівноважні стани, досягнуті під час термічної обробки, можуть бути загублені. Відповідно, звичайно бажано охолоджувати нікель-титанові сплави після термічної обробки досить швидко для збереження рівноважних або майже рівноважних станів, досягнутих під час термічної обробки. Наприклад, після термічної обробки сплаву, він може бути охолоджений повітрям, рідинним загартовуванням або повітряним загартовуванням.

Звернемося тепер до фігури 2, де показана графічна залежність «стабільна температура перетворення аустеніту - температура старіння» для двох нікель-титанових сплавів, що містять змінювані кількості нікелю. Два нікель-титанових сплави були ізотермічно постарені при вказаних температурах протягом приблизно 24 годин для того, щоб досягнути стабільної температури перетворення аустеніту. Як обговорено вище, стабільні температури перетворення є ознакою рівноважної або майже рівноважної кількості нікелю в твердому розчині в TiNi фазі сплавів при температурі термічної обробки.

Додатково, як можна бачити з графічної залежності на фігурі 2, можливо термічно обробляти нікель-титановий сплав для досягнення бажаної температури перетворення аустеніту шляхом вибору температури термічної обробки, яка має пов'язану з нею стабільну температуру перетворення аустеніту по суті рівну бажаній температурі перетворення аустеніту, і потім шляхом термічної обробки нікель-титанового сплаву при цій температурі для досягнення стабільної температури перетворення аустеніту. Оскільки стабільна температура перетворення аустеніту для даної температури термічної обробки може бути легко визначена (наприклад, шляхом досліджень ізотермічного старіння), то можливо передбачувати коректувати A_s і A_c нікель-титанових сплавів шляхом термічної обробки нікель-титанових сплавів для досягнення композиційних рівноважних або майже рівноважних станів в сплаві. Додатково, доти, поки вміст нікелю в сплаві є достатнім для досягнення межі розчинності в твердому стані при вибраній температурі термічної обробки, досягну-

та стабільна температура перетворення аустеніту буде незалежною від загального складу сплаву. Використовуваний тут, по відношенню до температур перетворення, термін «по суті рівний» означає, що температури перетворення знаходяться в межах 10°C або менше одна від одної. Тому, хоч не необхідно, температури перетворення, які по суті дорівнюють одна одній, можуть бути рівними одна одній.

Тепер будуть описані різні, необмежувальні, варіанти здійснення даного винаходу. Буде зрозуміло фахівцям в цій галузі техніки, що способи згідно з певними варіантами здійснення даного винаходу можуть бути використані в поєднанні з численною кількістю систем нікель-титанового сплаву, так само як і з системами іншого сплаву, що мають властивості, чутливі до мінімальних композиційних змін; однак, для ясності, аспекти даного винаходу були описані з посиланням на бінарні системи нікель-титанового сплаву. Хоч тут не як обмеження, вважають, що способи згідно з певними варіантами здійснення даного винаходу є корисними в обробці бінарних, потрійних і четвертих систем сплаву, що включають нікель і титан в поєднанні з, щонайменше, одним іншим легуючим елементом. Наприклад, потрійні системи нікель-титанового сплаву вважаються придатними для включення в різні варіанти здійснення даного винаходу, але що не обмежують його, системи сплаву нікель-титан-гафній; нікель-титан-мідь; нікель-титан-залізо.

У одному необмежувальному варіанті здійснення даного винаходу нікель-титановий сплав, що містить від більше 50 аж до 55% нікелю, термічно обробляють для забезпечення бажаної температури перетворення аустеніту. Більш конкретно, згідно з цим варіантом здійснення даного винаходу спосіб включає вибір бажаної температури перетворення аустеніту і термічну обробку нікель-титанового сплаву для регулювання кількості нікелю в твердому розчині в TiNi фазі сплаву таким чином, що стабільна температура перетворення аустеніту, яка по суті дорівнює бажаній температурі перетворення аустеніту, досягається під час термічної обробки. Додатково, як обговорено вище, доти, поки кількість нікелю, присутнього в нікель-титановому сплаві, є достатньою для досягнення межі розчинності в твердому стані при температурі термічної обробки, досягнута температура перетворення аустеніту може бути незалежною від загального складу сплаву. Додатково, хоч і не потрібно, згідно з цим необмежувальним варіантом здійснення бажана температура перетворення аустеніту може знаходитися в межах від приблизно -100°C до приблизно 100°C.

Хоч не призначено для обмеження, вважають, що вплив термічної обробки на температуру перетворення аустеніту нікель-титанових сплавів, що містять 50% або менше за нікель, є дуже маленьким, щоб бути корисним в промислового масштабі, тоді як нікель-титанові сплави, які мають більше 55% нікелю вважаються дуже крихкими для промислової обробки. Однак фахівці в цій галузі техніки можуть знати певні застосування, для яких бажані нікель-титанові сплави, що містять більше

55% нікелю. У таких випадках сплави, що містять більше 55% нікелю, можуть бути використані в поєднанні з різними варіантами здійснення даного винаходу. Теоретично, сплави, що містять аж до приблизно 75% нікелю (тобто всередині області фази TiNi + TiNi₃), повинні піддаватися обробці згідно з різними варіантами здійснення даного винаходу, однак час, необхідний для термічної обробки таких високонікелевих сплавів, а також крихка природа цих високонікелевих сплавів, роблять їх не дуже придатними для більшості промислових застосувань.

Інший необмежувальний варіант здійснення способу обробки нікель-титанового сплаву для забезпечення бажаної температури перетворення аустеніту згідно з даним винаходом включає вибір нікель-титанового сплаву, що містить від більше 50 аж до 55 атомних процентів нікелю, вибір бажаної температури перетворення аустеніту і термічну обробку вибраного нікель-титанового сплаву для коректування кількості нікелю в твердому розчині в TiNi фазі сплаву таким чином, що стабільна температура перетворення аустеніту досягається під час термічної обробки, причому стабільна температура перетворення аустеніту по суті дорівнює бажаній температурі перетворення аустеніту. Згідно з цим необмежувальним варіантом здійснення вибраний нікель-титановий сплав містить достатньо нікелю для досягнення межі розчинності в твердому стані під час термічної обробки. Додатково, згідно з цим необмежувальним варіантом здійснення, стабільна температура перетворення аустеніту може бути незалежною від загального складу сплаву. Додатково, хоч не необхідно, бажана температура перетворення аустеніту згідно з цим необмежувальним варіантом здійснення може знаходитися в межах від приблизно -100°C до приблизно 100°C.

У іншому необмежувальному варіанті здійснення даного винаходу два або більша кількість нікель-титанових сплавів, які мають змінювані склади і містять від більше 50 аж до 55 атомних процентів нікелю, обробляють так, що сплави мають бажану температуру перетворення аустеніту. Згідно з цим необмежувальним варіантом здійснення спосіб включає вибір бажаної температури перетворення аустеніту і піддавання нікель-титанових сплавів аналогічній термічній обробці таким чином, що після термічної обробки нікель-титанові сплави мають стабільні температури перетворення аустеніту, які по суті є рівними бажаній температурі перетворення аустеніту. Як обговорено попередньо, доти, поки нікель-титанові сплави мають достатньо нікелю для досягнення межі розчинності в твердому стані під час термічної обробки, стабільна температура перетворення аустеніту сплавів буде незалежною від загального складу сплавів. Додатково, хоч не необхідно, згідно з цим необмежувальним варіантом здійснення бажана температура перетворення аустеніту може знаходитися в межах від приблизно -100°C до приблизно 100°C. Використовуваний тут термін "аналогічна термічна обробка" означає, що нікель-титанові сплави обробляють або разом, або обробляють окремо, але використовуючи такі ж або подібні

параметри обробки.

Як обговорено попередньо, під час отвердіння нікель-титанового сплаву, сплав може стати композиційно сегрегованим. Звичайно, така композиційна сегрегація приводить до різних температур перетворення по всьому сплаву. Це звичайно вимагає, щоб окремі композиційні коректування були виконані по всьому сплаву для того, щоб досягнути рівномірної температури перетворення аустеніту. Як буде зрозуміло фахівцям в цій галузі техніки, це вимагає виконання ускладнених композиційних коректувань для сплаву. Однак було знайдено, що шляхом термічної обробки нікель-титанових сплавів, які композиційно сегреговані, згідно з різними варіантами здійснення даного винаходу рівномірна температура перетворення аустеніту по всьому сплаву може бути досягнута без необхідності таких ускладнених композиційних коректувань.

Відповідно, певні варіанти здійснення даного винаходу забезпечують способи обробки нікель-титанового сплаву, який включає області зі змінюваним складом, що містить від більше 50 аж до 55 атомних процентів нікелю таким чином, що кожна область має бажану температуру перетворення. Більш конкретно, спосіб включає термічну обробку сплаву для коректування кількості нікелю в твердому розчині в ТІМ фазі в кожній області нікель-титанового сплаву таким чином, що після термічної обробки нікель-титанового сплаву кожна з областей нікель-титанового сплаву має стабільну температуру перетворення аустеніту, яка по суті дорівнює бажаній температурі перетворення аустеніту.

Як обговорено попередньо, осадження нікелю з твердого розчину в ТІНІ фазі з утворенням багатих нікелем осадів може підвищити міцність нікель-титанового сплаву за допомогою дисперсійного тверднення. Відповідно, в певних варіантах здійснення даного винаходу, в яких багаті нікелем осадки утворюються під час термічної обробки, термічно оброблювані нікель-титанові сплави можуть переважно володіти підвищеною межею міцності на розтягнення і/або підвищеною твердістю в порівнянні зі сплавами до термічної обробки.

Тепер будуть обговорені придатні, необмежувальні способи термічної обробки нікель-титанових сплавів згідно з вищезазначеними необмежувальними варіантами здійснення даного винаходу. Способи термічної обробки нікель-титанових сплавів згідно з різними варіантами здійснення даного винаходу включають, але не обмежуються, обробки ізотермічним старінням, багатоетапні або ступеневі обробки старінням і обробки регульованим охолодженням. Використовуваний тут термін "ізотермічне старіння" означає витримання сплаву в печі при постійній температурі печі протягом періоду часу. Однак, як буде зрозуміло фахівцям в цій галузі техніки, через обмеження обладнання під час обробки ізотермічним старінням можуть мати місце мінімальні коливання температури печі.

Наприклад, в певних варіантах здійснення даного винаходу термічна обробка нікель-титанового сплаву включає ізотермічне старіння нікель-

титанового сплаву. Як обговорено попередньо, температура, при якій нікель-титановий сплав термічно обробляють, буде залежати від бажаної температури перетворення аустеніту. Таким чином, наприклад, в певних необмежувальних варіантах здійснення даного винаходу, в яких термічна обробка нікель-титанового сплаву включає ізотермічне старіння нікель-титанового сплаву, температура ізотермічного старіння може знаходитися в межах від 500°C до 800°C.

Хоча, не як обмеження, вважають, що, хоч ізотермічне старіння при температурах нижчих приблизно 500°C може бути використане відповідно до різних варіантів здійснення, але необхідний час для досягнення рівноважних або майже рівноважних станів при температурі старіння нижчих приблизно 500°C звичайно є дуже тривалим, що обмежує корисність для багатьох промислових застосувань. Додатково, ізотермічне старіння при температурах понад приблизно 800°C може бути використане відповідно до різних варіантів здійснення даного винаходу, однак багаті нікелем сплави, постарені при температурах понад приблизно 800°C, мають тенденцію бути дуже крихкими для того, щоб бути корисними в багатьох промислових застосуваннях. Однак фахівці в даній галузі техніки можуть знати застосування, для яких температури старіння нижча за приблизно 500°C або понад приблизно 800°C можуть бути корисні. Відповідно, варіанти здійснення даного винаходу розглядають термічну обробку нікель-титанових сплавів при температурах нижчих приблизно 500°C або понад приблизно 800°C.

Буде зрозуміло фахівцям в даній галузі техніки, що необхідна тривалість обробки ізотермічним старінням для досягнення стабільної температури перетворення аустеніту буде змінюватися, частково залежачи від конфігурації (або площі поперечного перерізу) сплаву (тобто бруски, дріт, плоскі заготовки і т.д.), температури старіння, а також від загального вмісту нікелю в сплаві. Наприклад, не як обмеження, при термічній обробці супертонкого нікель-титанового дроту (тобто дроту діаметром меншим приблизно 0,03 дюйми) або нікель-титанової фольги можуть бути використані періоди часу ізотермічного старіння, щонайменше, 2 години відповідно до варіантів здійснення даного винаходу. При ізотермічному старінні сплавів з великими поперечними перерізами час старіння може бути більше 2 годин і можливо, щонайменше, 24 години або більше. Аналогічним чином, якщо сплави, які мають менші поперечні перерізи термічно обробляють, то час ізотермічного старіння може бути меншим 2 годин.

Додатково, якщо загальний склад нікель-титанового сплаву багатий нікелем в порівнянні з межею розчинності в твердому стані при температурі термічної обробки, і/або застосовується відносно низька температура термічної обробки для досягнення бажаної температури перетворення аустеніту, час, необхідний для досягнення стабільної температури перетворення аустеніту, може бути довшим, ніж бажаний для деяких промислових застосувань. Однак було знайдено, що час, необхідний для досягнення стабільної температури

ри перетворення аустеніту в дуже багатих нікелем сплавах і/або при низьких температурах термічної обробки, може бути знижений шляхом застосування багатоетапної термічної обробки, як описано нижче.

Більш конкретно, згідно з певними варіантами здійснення даного винаходу, термічна обробка нікель-титанового сплаву для досягнення стабільної температури перетворення аустеніту, яка по суті дорівнює бажаній температурі перетворення аустеніту, включає старіння нікель-титанового сплаву при першій температурі старіння і потім старіння нікель-титанового сплаву при другій температурі старіння, при цьому перша температура старіння вище другої температури старіння. Згідно з цим варіантом здійснення другу температуру старіння вибирають так, щоб досягнути бажаної температури перетворення аустеніту, як детально описано нижче. Тобто, після старіння при другій температурі старіння сплав буде мати стабільну температуру перетворення аустеніту, яка по суті дорівнює бажаній температурі перетворення і є ознакою композиційного рівноважного або майже рівноважного стану в сплаві при другій температурі старіння.

Не маючи наміру обмежуватися якою-небудь конкретно теорією, першу температуру старіння, яка вища другої температури старіння, але нижча за температуру розчинення надмірної фази сплаву, вибирають так, щоб підвищити початкову швидкість дифузії нікелю в сплаві. Після цього бажана температура перетворення аустеніту досягається шляхом старіння нікель-титанового сплаву при другій температурі старіння, маючи стабільну температуру перетворення аустеніту по суті рівну бажаній температурі перетворення. Хоча немає потреби, після старіння при другій температурі старіння нікель-титановий сплав може мати рівноважну кількість нікелю в твердому розчині в TiNi фазі.

Звернемося до фігури 3, де показана графічна залежність «температура перетворення аустеніту - час старіння» для двох нікель-титанових сплавів, які були постарені з використанням процедури двоетапного старіння. Хоч і не показано на діаграмі, до старіння при 566°C обидва сплави зазнавали старіння протягом приблизно 24 годин при 675°C для підвищення початкової швидкості дифузії нікелю в сплаві. Потім обидва сплави зазнавали старіння при 566°C, як показано графічною залежністю на фігурі 3. Як можна бачити з графічної залежності на фігурі 3, після приблизно 72 годин досягаються стабільні температури A_s і A_c , які також є незалежними від загального складу сплаву. Навпаки, якщо сплави зазнавали ізотермічного старіння в один етап обробки старінням (тобто тільки при 566°C), то були б потрібні періоди часу старіння, що перевищують 72 години, для досягнення стабільних температур перетворення через відносно низьку дифузійну швидкість нікелю при цій температурі і відносно високий вміст нікелю.

У одному необмежувальному варіанті здійснення двоетапної процедури старіння згідно з певними варіантами здійснення даного винаходу нікель-титановий сплав ізотермічно постарений при

першій температурі старіння, що знаходиться в межах від 600°C до 800°C, і потім постарений при більш низькій другій температурі старіння, що знаходиться в межах від 500°C до 600°C. Додатково, хоч не необхідно, нікель-титановий сплав може бути постарений при першій температурі старіння протягом, щонайменше, 2 годин і при другій температурі старіння протягом, щонайменше, 2 годин. Як обговорено попередньо, згідно з цим варіантом здійснення стабільна температура перетворення аустеніту досягається під час старіння при другій температурі старіння.

Буде також зрозуміло фахівцям в цій галузі техніки, що, оскільки надлишок вмісту нікелю нікель-титанового сплаву зменшується, то рушійна сила для зародка утворення багатих нікелем осадів також зменшується. Додатково, якщо для того щоб досягнути бажаної температури перетворення аустеніту сплав термічно обробляють при температурі близькій до температури розчинення надмірної фази сплаву, то рушійна сила і швидкість зародка утворення багатих нікелем осадів буде зовсім низькою під час термічної обробки. Відповідно, час, необхідний для досягнення стабільної температури перетворення аустеніту, яка по суті дорівнює бажаній температурі перетворення аустеніту, може бути довшим, ніж бажана для деяких промислових застосувань. Однак було знайдено, що шляхом застосування двоетапної термічної процедури час, необхідний для досягнення стабільної температури перетворення аустеніту, може бути зменшено. Більш конкретно, згідно з певними варіантами здійснення даного винаходу термічна обробка нікель-титанового сплаву для досягнення стабільної температури перетворення аустеніту, по суті рівній бажаній температурі перетворення аустеніту, включає старіння нікель-титанового сплаву при першій температурі старіння і потім старіння нікель-титанового сплаву при другій температурі старіння, при цьому перша температура старіння нижче другої температури старіння.

Не маючи намір обмежуватися якою-небудь конкретно теорією, фахівцям в цій галузі техніки буде зрозуміло, що рушійна сила для гомогенного зародка утворення багатих нікелем осадів з перенасиченої TiNi фази може бути підвищена шляхом зниження температури сплаву нижче за температуру розчинення надмірної фази сплаву, тобто при охолодженні нижче за температуру розчинення надмірної фази сплаву. Таким чином, за допомогою використання першої температури старіння, яка нижча за температуру старіння, необхідну для досягнення бажаної температури перетворення, може бути підвищена швидкість зародка утворення багатих нікелем осадів. Однак ядра формуються при першій температурі старіння, причому зростання осадів (виділень) за допомогою дифузії нікелю буде відбуватися швидше, якщо температура старіння підвищується. Відповідно, після старіння нікель-титанового сплаву при першій температурі старіння нікель-титановий сплав піддають старінню при другій температурі старіння, яка є більш високою, ніж перша температура старіння. Більш конкретно, другу температуру старіння вибирають таким чином, що стабільна температура

перетворення аустеніту, досягнута під час старіння при другій температурі старіння, по суті дорівнює бажаній температурі перетворення аустеніту. При застосуванні двоетапної процедури старіння з використанням першої температури старіння, яка нижча другої температури старіння, було знайдено, що загальний час старіння, необхідний для досягнення стабільної температури перетворення аустеніту, яка по суті дорівнює бажаній температурі перетворення аустеніту, може бути зменшений. У одному конкретному необмежувальному прикладі процедури двоетапного старіння згідно з цим варіантом здійснення даного винаходу нікель-титановий сплав піддають ізотермічному старінню при першій температурі старіння, що знаходиться в межах від 500°C до 600°C, і потім старінню при другій температурі старіння, що знаходиться в межах від 600°C до 800°C. Додатково, хоч не необхідно, нікель-титановий сплав може бути постарений при першій температурі старіння протягом, щонайменше, 2 годин і при другій температурі старіння протягом, щонайменше, 2 годин. Як обговорено попередньо, згідно з цим варіантом здійснення стабільна температура перетворення аустеніту досягається під час старіння при другій температурі старіння.

Тепер будуть обговорені способи обробки нікель-титанових сплавів для досягнення бажаного інтервалу температур перетворення. Як обговорено попередньо, корисність сплавів з пам'яттю форми залежить від температур перетворення сплаву, а також інтервалу температур перетворення. Використовуваний тут термін "інтервал температур перетворення" означає різницю між початковою і кінцевою температурами для даного фазового перетворення для даного сплаву (тобто A_s - A_f або M_s - M_f). Використовуваний тут термін "інтервал температур перетворення аустеніту" означає різницю між A_s і A_f температурою для даного сплаву (тобто A_s - A_f). Додатково, використовуваний тут відносно температурних інтервалів перетворення термін «по суті рівний» означає, що температурні інтервали перетворення знаходяться в межах 10°C або менше один від одного. Тому, хоч не необхідно, інтервали температур перетворення, які є по суті рівними один одному, можуть дорівнювати один одному.

Хоч не як обмеження, в деяких застосуваннях бажаний вузький інтервал температур перетворення. Звичайно вузький інтервал температур перетворення бажаний в застосуваннях, які використовують супереластичні властивості нікель-титанових сплавів, наприклад, але не як обмеження, антенний провід і оправу окулярів. При інших застосуваннях бажаний широкий інтервал температур перетворення. Звичайно широкий інтервал температур перетворення бажаний в застосуваннях, що вимагають різні міри перетворення при різних температурах, наприклад, але не як обмеження, теплові приводи.

Звертаючись знову до фігури 1, можна бачити з графічної залежності для цих даних, що при збільшенні часу старіння інтервал температур перетворення аустеніту як для сплаву з 55% ат. Ni, так і для сплаву з 52% ат. Ni зменшується. Наприклад,

після старіння сплаву з 52% ат. Ni протягом 2 годин при 675°C сплав має інтервал температур перетворення аустеніту приблизно 18°C, і після 6 годин старіння - інтервал температур перетворення аустеніту становить приблизно 11°C. Однак після 24 годин старіння при 675°C сплав з 52% ат. Ni має інтервал температур перетворення аустеніту менше за приблизно 5°C. Додатково, коли час старіння збільшується понад 24 годин, цей інтервал температур перетворення аустеніту істотно не змінюється. Аналогічним чином, після старіння сплаву з 55% ат. Ni протягом 2 годин при 675°C сплав має інтервал температур перетворення аустеніту приблизно 21°C, і після 6 годин старіння інтервал температур перетворення аустеніту становить приблизно 13°C. Однак після 24 годин старіння при 675°C сплав з 52% ат. Ni має інтервал температур перетворення аустеніту менше за приблизно 5°C. Додатково, коли час старіння збільшується понад 24 годин, цей інтервал температур перетворення аустеніту істотно не змінюється.

Звернемося тепер до фігур 4-6, де показані три криві диференціальної скануючої калориметрії (DSC-криві), отримані для нікель-титанового сплаву, що містить 55 атомних процентів нікелю. DSC-крива на фігурі 4 була отримана від сплаву з 55 атомними процентами нікелю, який був ізотермічно постарений при 650°C протягом 2 годин. DSC-крива на фігурі 5 була отримана від сплаву з 55 атомними процентами нікелю після ізотермічного старіння при 650°C протягом 24 годин, і DSC-крива на фігурі 6 була отримана від сплаву з 55 атомними процентами нікелю після ізотермічного старіння при 650°C протягом 216 годин.

Звернемося до фігури 4, де верхній пік, який звичайно позначається як 40, являє собою інтервал температур, вище якого мартенситне перетворення має місце при охолодженні сплаву. Наприклад, як звичайно вказано на фігурі 4, мартенситне перетворення починається при M_s температурі, що звичайно позначається як 42, і закінчується при M_f температурі, що звичайно позначається як 44. Нижній пік, що звичайно позначається як 45, являє собою інтервал температур, вище за яке має місце аустенітне перетворення при нагріванні сплаву. Наприклад, як вказано на фігурі 4, перетворення аустеніту починається при A_s температурі, що звичайно позначається як 47, і закінчується при A_f температурі, що звичайно позначається як 49.

Як можна бачити з DSC-кривих на фігурах 4-6, інтервали температури перетворення як мартенситу, так і аустеніту звужуються із збільшенням часу старіння при 650°C. Таким чином, наприклад, верхній пік 50 (на фігурі 5) є більш гострим і більш вузьким, ніж верхній пік 40 (на фігурі 4); і верхній пік 60 (на фігурі 6) є більш гострим і більш вузьким, ніж і верхній пік 40 і верхній пік 50. Аналогічним чином, нижній пік 55 (на фігурі 5) є більш гострим і більш вузьким, ніж нижній пік 45 (на фігурі 4); і нижній пік 65 (на фігурі 6) є більш гострим і більш вузьким, ніж і нижній пік 45 і нижній пік 55.

Як обговорено вище, нарівні з температурою перетворення аустеніту бажано регулювання інтервалу температур перетворення аустеніту до

вузького інтервалу в певних застосуваннях. Тому певні варіанти здійснення даного винаходу пропонують способи обробки нікель-титанового сплаву, що містить від більше 50 аж до 55 атомних процентів нікелю для досягнення бажаного інтервалу температур перетворення аустеніту. Більш конкретно, способи включають ізотермічне старіння нікель-титанового сплаву в печі при температурі, що знаходиться в межах від 500°C до 800°C протягом 2 годин, при цьому після ізотермічного старіння нікель-титановий сплав має інтервал температур перетворення аустеніту не більше 15°C. Хоч не необхідно, згідно з цим необмежувальним варіантом здійснення час старіння може складати, щонайменше, 3 години, щонайменше, 6 годин і може складати, щонайменше, 24 години, залежачи, між іншим, від бажаного інтервалу температур перетворення аустеніту. Додатково, згідно з цим необмежувальним варіантом здійснення інтервал температур перетворення аустеніту, досягнутий після ізотермічного старіння, може складати не більше 10°C і може складати не більше 6°C, залежачи, частково, від умов ізотермічного старіння.

Додатково, як обговорено попередньо, нікель-титанові сплави можуть стати композиційно сегрегованими під час затвердження. Тому різні варіанти здійснення даного винаходу також передбачають способи обробки нікель-титанових сплавів, що включають області зі змінюваним складом, що містять від більше 50 аж до 55 атомних процентів нікелю таким чином, що кожна область має бажаний інтервал температур перетворення аустеніту. Згідно з цими варіантами здійснення спосіб включає ізотермічне старіння нікель-титанового сплаву для коректування кількості нікелю в твердому розчині в ТІМ фазі в кожній області нікель-титанового сплаву, при цьому після ізотермічного старіння нікель-титанового сплаву кожна з областей нікель-титанового сплаву має інтервал температур перетворення аустеніту не більше 15°C. Хоч не необхідно, згідно з цим необмежувальним варіантом здійснення час старіння може складати, щонайменше, 2 години, щонайменше, 3 години, щонайменше, 6 годин, і, щонайменше, 24 години, залежачи, між іншим, від бажаного інтервалу температур перетворення аустеніту. Додатково, згідно з цим необмежувальним варіантом здійснення інтервал температур перетворення аустеніту, досягнутий після ізотермічного старіння може складати не більше 10°C і може складати не більше 6°C, залежачи, частково, від умов ізотермічного старіння. Як обговорено попередньо, нарівні з температурами перетворення аустеніту бажано регулювання інтервалу температур перетворення аустеніту в широкому діапазоні для певних застосувань. Відповідно, певні варіанти здійснення даного винаходу пропонують способи обробки нікель-титанового сплаву, що містить від більше 50 аж до 55 атомних процентів нікелю для досягнення бажаної температури перетворення аустеніту і бажаного інтервалу температур перетворення. Більш конкретно, спосіб включає старіння нікель-титанового сплаву в печі при першій температурі старіння для досягнення стабільної температури перетворення аустеніту, і потім старіння нікель-титанового сплаву

при другій температурі старіння, яка є більш низькою, ніж перша температура старіння, при цьому, після старіння нікель-титанового сплаву при другій температурі старіння, нікель-титановий сплав має інтервал температур перетворення аустеніту, який по суті дорівнює бажаному інтервалу температур перетворення аустеніту. Додатково, згідно з необмежувальним варіантом здійснення інтервал температур перетворення, досягнутий при старінні при другій температурі старіння, більший температури перетворення аустеніту, досягнутої при старінні нікель-титанового сплаву при першій температурі старіння.

У іншому необмежувальному варіанті здійснення даного винаходу спосіб обробки нікель-титанового сплаву, що містить від більше 50 аж до 55 атомних процентів нікелю, для досягнення бажаного інтервалу температур, включає старіння нікель-титанового сплаву в печі при першій температурі старіння для досягнення стабільної температури перетворення аустеніту і потім старіння нікель-титанового сплаву при другій температурі старіння, яка вища першої температури старіння, при цьому, після старіння при другій температурі старіння нікель-титановий сплав має інтервал температур перетворення аустеніту, який по суті дорівнює бажаному інтервалу температур перетворення аустеніту. Додатково, згідно з цим необмежувальним варіантом здійснення інтервал температур перетворення, досягнутий при старінні при другій температурі старіння більший температури перетворення аустеніту, досягнутої при старінні нікель-титанового сплаву при першій температурі старіння.

Різні варіанти здійснення даного винаходу будуть тепер проілюстровані наступними, необмежувальними прикладами.

Приклади

Приклад 1

Два нікель-титанових сплави, один - який містить приблизно 52 атомних проценти нікелю і один - який містить приблизно 55 атомних процентів нікелю були приготовані, як викладено нижче. Чисті нікелеві і титанові лігатури, необхідні для кожного сплаву, були зважені і вміщені у вакуумну дугову електроду для переплавлення. Потім сплави були виплавлені і потім відлиті в прямокутну пластину. Після відливання кожний нікель-титановий сплав був підданий гарячій обробці для подрібнення зернистої структури. Потім були зроблені спроби виміряти температури перетворення аустеніту сплаву (як A_c , так і A_f) до яких-небудь обробок старінням. Однак оскільки сплави були композиційно сегреговані, то температури перетворення аустеніту не могли бути визначені.

Після цього зразки кожного сплаву були ізотермічно постарені в печі протягом періодів часу і при температурах, показаних в таблиці 1.

Після кожного проміжку часу старіння були визначені температури перетворення аустеніту для кожного сплаву з використанням випробування на пружне вільне повернення форми після деформації (bend free recovery test), яке було проведене, як викладено нижче. Спочатку плоский зразок, що випробовується, був охолоджений до температури

приблизно -196°C (тобто нижче за M_s сплаву) шляхом занурення зразка в рідкий азот. Після цього зразок був деформований в перевернену U-подібну форму з використанням оправки, яка також була охолоджена зануренням в рідкий азот. Діаметр оправки був вибраний згідно з наступним рівнянням:

$$D_m = T/\epsilon - T,$$

де D_m - діаметр оправки, T - товщина зразка і ϵ - бажаний процент деформації, тут - три проценти. Після цього зразок переверненої U-подібної форми був вміщений прямо під датчик лінійного диференціального змінного трансформатора (LVDT (linear variable differential transformer)) у ванну з метанолом і рідким азотом, яка має температуру приблизно на 10°C нижче передбачуваної A_s сплаву. Ванну, яка містить зразок і LVDT-датчик потім нагрівали, використовуючи гарячу плиту. Як тільки зразок у ванні нагрівався, він починав пове-

ртатися назад до своєї первинної форми (тобто плоскої), що колись була у зразка при температурі, яка досягала температури A_s сплаву. Повернення до первинної, плоскої форми було закінчене при температурі A_f сплаву. Дані, відповідні відносній деформації зразка, були зібрані, використовуючи LVDT-датчик при нагріванні зразка, і занесені в комп'ютер. Потім була побудована крива залежності «деформація - температура», і температури A_s і A_f визначали на основі апроксимації точок перегино кривої. Зокрема, точки перетину трьох ліній апроксимації лінійної регресії, відповідні трьом ділянкам кривої - тобто ділянці низької температури і високої температури, в яких крива залежності «деформація - температура» має відносно маленький нахил і проміжну ділянку, в якій крива має відносно великий нахил - були використані для приблизного визначення A_s і A_f температур зразка.

Таблиця 1

Температура ізотермічного старіння	Час старін- ня	52% ат. Ni			55% ат. Ni		
$^{\circ}\text{C}$	години	A_s	A_f	Інтервал температур перетворення аустеніту	A_s	A_f	Інтервал температур перетворення аустеніту
675	2	-49	-31	18	-22	-1	21
	6	-28	-17	11	-9	4	13
	24	-18	-14	4	-12	-9	3
	72	-26	-21	5	-20	-16	4
	216	-21	-17	4	-16	-11	5
650	2	-88	-56	32	-12	7	19
	6	-13	4	17	4	10	6
	24	0	5	5	5	7	2
	72	3	7	4	6	10	4
	216	10	12	2	11	17	6

Як можна бачити з таблиці 1, шляхом старіння будь-якого з сплавів протягом 24 годин можуть бути досягнуті стабільні температури перетворення аустеніту (як A_s , так і A_f), (тобто A_s і A_f кожного з сплавів після 24 годин старіння при 675°C не відхиляються більше ніж на 10°C при термічній обробці нікель-титанового сплаву в тих же самих умовах протягом 8 годин).

Додатково, стабільні температури перетворення аустеніту, досягнуті після 24 годин старіння при 675°C , є також незалежними від загального складу нікель-титанового сплаву. Тобто, A_s сплаву з 55% ат. Ni знаходиться в межах 10°C від A_s сплаву з 52% ат. Ni після термічної обробки сплавів при 675°C протягом 24 годин; і A_f сплаву з 55% ат. Ni знаходиться в межах 10°C від A_f сплаву з 52% ат. Ni після термічної обробки сплавів при 675°C протягом 24 годин. Передбачають, що зниження A_s і A_f , яке спостерігається після 72 годин старіння при 675°C , не є представницьким і може бути приписано до коливань температури печі під час старіння.

Для порівняння, хоч це виявляється після старіння сплавів протягом 6 годин при 675°C , A_s і A_f сплаву з 52% ат. Ni і A_s сплаву з 55% ат. Ni є стабільними, причому температури перетворення

аустеніту є незалежними від загального складу сплаву. Додатково, після 2 годин старіння при 675°C температури перетворення аустеніту для обох сплавів не є ні стабільними, ні незалежними від загального складу сплаву.

Стабільні температури перетворення (як A_s , так і A_f) можуть бути також досягнуті для обох сплавів шляхом старіння сплавів протягом 24 годин при 650°C (тобто A_s і A_f кожного з сплавів після приблизно 24 годин старіння при 650°C не відхиляються більше ніж на 10°C при термічній обробці нікель-титанового сплаву в тих же самих умовах протягом додаткових 8 годин). Додатково, стабільні температури перетворення, досягнуті після 24 годин старіння при 650°C , є також незалежними від загального складу нікель-титанового сплаву. Тобто, A_s сплави з 55% ат. Ni знаходиться в межах 10°C від A_s сплаву з 52% ат. Ni після термічної обробки сплавів при 650°C протягом 24 годин; і A_f сплаву з 55% ат. Ni знаходиться в межах 10°C від A_f сплаву з 52% ат. Ni після термічної обробки сплавів при 650°C протягом 24 годин.

Для порівняння, хоч це виявляється після старіння сплавів протягом 6 годин при 650°C , для яких A_f сплаву з 52% ат. Ni і A_s і A_f сплаву з 55% ат. Ni є стабільними, початкові температури аус-

теніту не є незалежними від загального складу. Додатково, після приблизно 2 годин старіння при 650°C тільки A_f сплаву з 55% ат. Ni стає стабільною, але ні A_s , ні A_f сплавів не є незалежними від загального складу сплавів.

Хоч, не як обмеження, передбачають, що первинна кількість нікелю в твердому розчині в TiNi фазі в сплаві з 55% ат. Ni перед старінням була більш близькою до межі розчинності нікелю в твердому стані в TiNi фазі при 650°C, ніж для сплаву з 52% ат. Ni. Тому, час старіння при 650°C, необхідний для досягнення стабільних температур перетворення аустеніту для сплаву з 55% ат. Ni, був меншим, ніж для сплаву з 52% ат. Ni. Однак, як показує таблиця 1, температури перетворення аустеніту, які обидві є стабільними і незалежними від загального складу сплаву, можуть бути досягнуті шляхом старіння сплавів протягом 24 годин при 650°C. Тому може бути використана та ж сама термічна обробка для обох сплавів, безвідносно первинного стану сплаву. Додатково, як показує таблиця 1, стабільні температури перетворення (A_s і A_f), досягнуті після старіння нікель-титанових сплавів протягом 24 годин при 675°C, є більш низькими, ніж стабільні температури перетворення, досягнуті після старіння нікель-титанових сплавів протягом 24 годин при 650°C. Не маючи на увазі обмежуватися якою-небудь конкретною теорією, як обговорено попередньо, вважають, що це може

бути приписане різним межам розчинності нікелю в твердому стані в TiNi фазі при 675°C в порівнянні з 650°C. Іншими словами, характеристичні температури перетворення аустеніту для нікель-титанових сплавів, що мають рівноважну кількість нікелю в твердому розчині в TiNi фазі при 675°C, є більш низькими, ніж характеристичні температури перетворення аустеніту для нікель-титанових сплавів, що мають рівноважну кількість нікелю в твердому розчині в TiNi фазі при 650°C.

Крім того, як показує таблиця 1, інтервал температур перетворення аустеніту звичайно має тенденцію до звуження з підвищенням часу старіння при даній температурі старіння для обох сплавів.

Приклад 2

Додаткові зразки двох сплавів, приготованих згідно з вищенаведеним прикладом 1, були поставлені з використанням наступної двоетапної процедури старіння. Сплави були такі, що зістарилися при першій температурі старіння приблизно 675°C протягом 24 годин і потім постарену при другій температурі старіння, як зазначено нижче, в таблиці 2. Після кожного періоду старіння були визначені температури перетворення аустеніту для кожного сплаву з використанням випробування на пружне вільне повернення форми після деформації, описаного в прикладі 1.

Таблиця 2

Друга температура старіння	Час старіння	52% ат. Ni				55% ат. Ni			
		A_s	A_f	Інтервал температур перетворення аустеніту		A_s	A_f	Інтервал температур перетворення аустеніту	
600	2	11	26	15		27	35	8	
	6	19	31	12		33	37	4	
	24	30	38	8		33	43	10	
	72	35	39	4		36	48	12	
	168	36	43	7		35	44	9	
566	2	-2	10	12		33	44	11	
	6	11	37	26		43	51	8	
	24	45	58	13		57	62	5	
	72	56	64	8		58	61	3	
	168	58	64	6		57	62	5	

Як можна бачити з таблиці 2, шляхом старіння будь-якого з сплавів протягом 24 годин при другій температурі старіння 600°C можуть бути досягнуті стабільні температури перетворення аустеніту (як A_s , так і A_f) (тобто A_s і A_f кожного з сплавів після 24 годин старіння при 600°C не відхиляються більше ніж на 10°C при термічній обробці нікель-титанового сплаву в тих же самих умовах протягом додаткових 8 годин). Додатково, стабільні температури перетворення, досягнуті після 24 годин старіння при другій температурі старіння 600°C, є також незалежними від загального складу нікель-титанового сплаву. Тобто, A_s сплаву з 55% ат. Ni знаходиться в межах 10°C від A_s сплаву з 52% ат. Ni після термічної обробки сплавів при другій температурі старіння 600°C протягом 24 годин; і A_f сплаву з 55% ат. Ni знаходиться в межах 10°C від

A_f сплаву з 52% ат. Ni після термічної обробки сплавів при другій температурі старіння 600°C протягом 24 годин.

Для порівняння, це виявляється після старіння сплавів протягом 6 годин при другій температурі 600°C, A_f сплаву з 52% ат. Ni, і A_s і A_f сплаву з 55% ат. Ni є стабільними, причому первинні температури аустеніту не є незалежними від загального складу. Додатково, після 2 годин старіння при другій температурі старіння 600°C ні A_s , ні A_f сплаву з 52% ат. Ni не є стабільними, і первинні температури аустеніту не є незалежними від загального складу.

Хоч, не як обмеження, вважають, що кількість нікелю в твердому розчині в TiNi фазі в сплаві з 55% ат. Ni перед старінням при другій температурі старіння була більш близькою до межі розчинності

нікелю в твердому стані в TiNi фазі при 600°C, ніж для сплаву з 52% ат. Ni. Тому, час старіння при 600°C, необхідний для досягнення стабільних температур перетворення аустеніту, для сплаву з 55% ат. Ni був меншим, ніж для сплаву з 52% ат. Ni. Однак, як показує таблиця 2, температури перетворення аустеніту, які обидві є стабільними і незалежними від загального складу, можуть бути досягнуті шляхом старіння сплавів протягом 24 годин при 600°C. Тому, та ж сама термічна обробка може бути використана для обох сплавів безвідносно первинного стану сплаву.

Як можна бачити з таблиці 2, старінням будь-якого сплаву протягом 72 годин при другій температурі старіння 566°C можуть бути досягнуті стабільні температури перетворення (як A_s , так і A_f) (тобто A_s і A_f кожного з сплавів після 72 годин старіння при 566°C не відхиляються більше ніж на 10°C при термічній обробці нікель-титанового сплаву в тих же самих умовах протягом додаткових 8 годин). Додатково, стабільні температури перетворення аустеніту, досягнуті після 72 годин старіння при другій температурі старіння 566°C, є також незалежними від загального складу нікель-титанового сплаву. Тобто, A_s сплаву з 55% ат. Ni знаходиться в межах 10°C від A_s сплаву з 52% ат. Ni після термічної обробки сплавів при другій температурі старіння 566°C протягом 72 годин; і A_f сплаву з 55% ат. Ni знаходиться в межах 10°C від A_f сплаву з 52% ат. Ni після термічної обробки сплавів при другій температурі старіння 566°C протягом 72 годин.

Для порівняння, хоч це виявляється після старіння сплавів протягом 24 годин при другій температурі старіння 566°C A_f сплаву з 52% ат. Ni і A_s і A_f сплаву з 55% ат. Ni є стабільними, причому первинні температури аустеніту не є незалежними від загального складу. Додатково, при старінні від 2 до 6 годин при другій температурі старіння 566°C, температури перетворення аустеніту не є ні стабільними, ні незалежними від загального складу.

Додатково, як показано в таблиці 2, стабільні температури перетворення (A_s і A_f), досягнуті після

старіння нікель-титанових сплавів протягом 24 годин при 600°C, є більш низькими, ніж стабільні температури перетворення, досягнуті після старіння нікель-титанових сплавів протягом 24 годин при 566°C. Не маючи на увазі обмежуватися якою-небудь конкретною теорією, як обговорено попередньо, вважають, що це може бути приписане різним межах розчинності нікелю в твердому стані в TiNi фазі при 600°C в порівнянні з 566°C. Іншими словами, характеристичні температури перетворення аустеніту для нікель-титанових сплавів, що мають рівноважну кількість нікелю в твердому розчині в TiNi фазі при 600°C, є більш низькими, ніж характеристичні температури перетворення аустеніту для нікель-титанових сплавів, що мають рівноважну кількість нікелю в твердому розчині в TiNi фазі при 566°C.

Крім цього, як показано в таблиці 2, інтервал температур перетворення аустеніту звичайно має тенденцію до звуження із збільшенням часу старіння при даній температурі старіння для обох сплавів. Як обговорено попередньо, що стосується температур перетворення аустеніту, вважають, що відносно маленькі коливання інтервалу температур перетворення аустеніту для сплаву з 55% ат. Ni, постареного при 600°C, властиві сплаву, що має кількість нікелю в твердому розчині в TiNi фазі близька до межі розчинності в твердому стані перед старінням при 600°C.

Потрібно розуміти, що даний опис ілюструє аспекти винаходу, суттєві для чіткого розуміння винаходу. Певні аспекти винаходу, які будуть очевидні фахівцям в цій галузі техніки і які, тому, не будуть сприяти кращому розумінню винаходу, не представлені для спрощення даного опису. Хоч даний винахід був описаний в поєднанні з певними варіантами здійснення, фахівці в цій галузі техніки після розгляду вищезазначеного опису зрозуміють, що можуть бути застосовані багато які модифікації і варіації винаходу. Мається на увазі, що всі такі варіації і модифікації винаходу призначаються для обхвату вищезазначеним описом і наступною формулою винаходу.

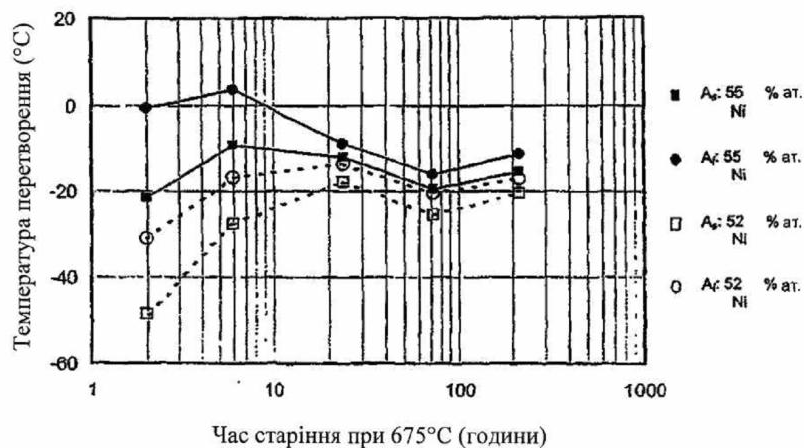


Fig.1

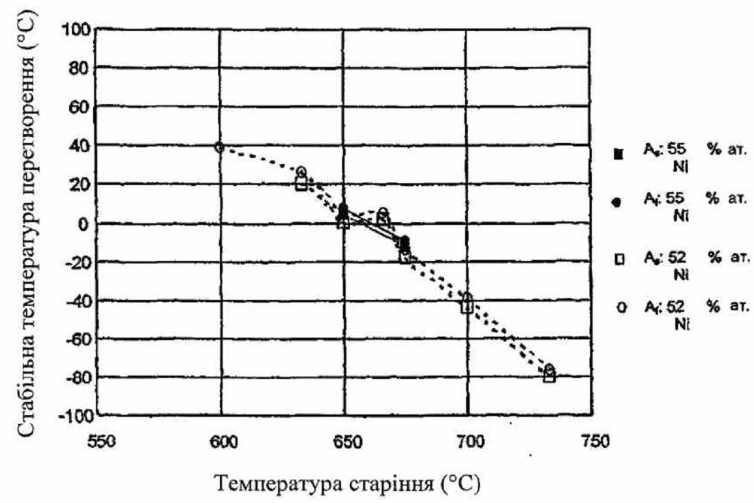


Fig. 2

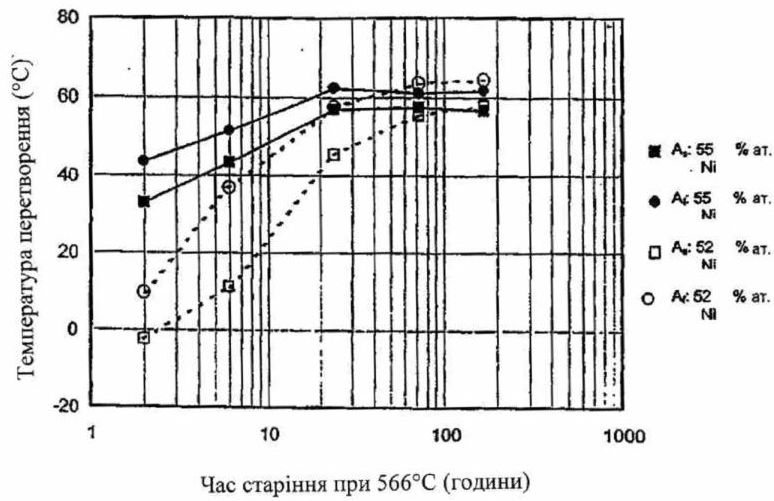
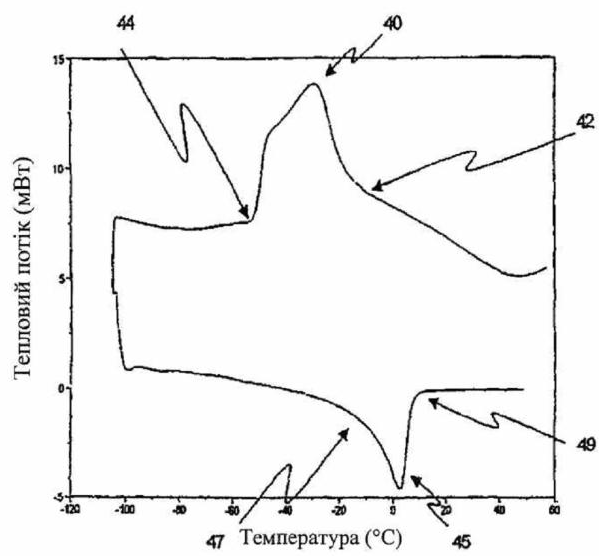
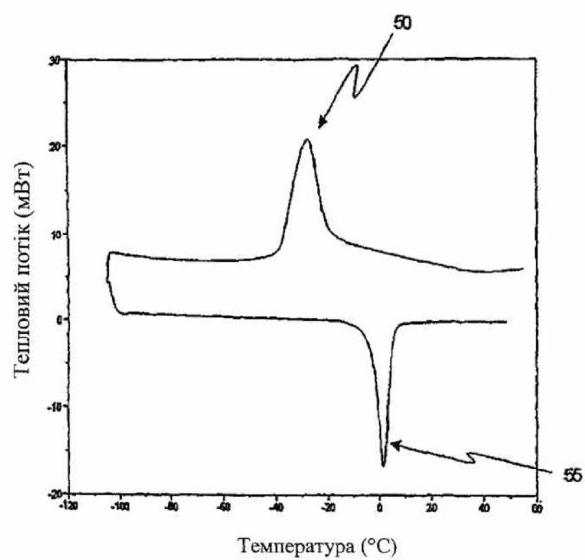


Fig. 3



Фиг.4



Фиг.5

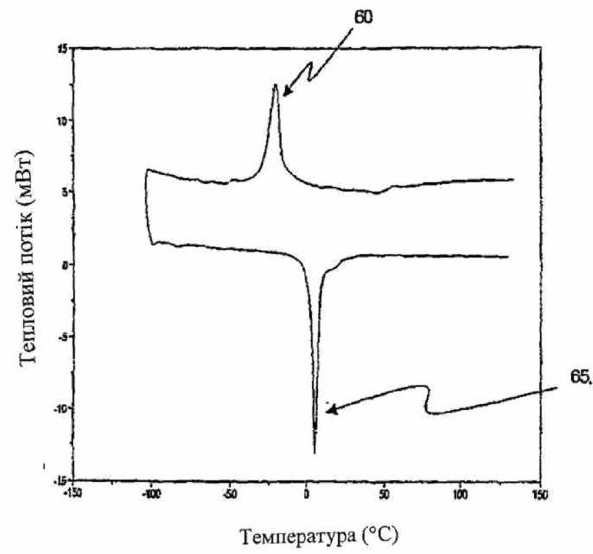


Fig.6