



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21), (22) Заявка: 2005137319/02, 07.04.2004

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
07.04.2004

(30) Конвенционный приоритет:
01.05.2003 US 10/427,783

(43) Дата публикации заявки: 27.04.2006

(45) Опубликовано: 20.01.2009 Бюл. № 2

(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: RU 2201470 C2, 27.03.2003. US
2002/0185200 A1, 12.12.2002. US 5843244 A,
01.12.1998. SU 1431353 A1, 09.06.1995.

(85) Дата перевода заявки РСТ на национальную фазу:
01.12.2005

(86) Заявка РСТ:
US 2004/010758 (07.04.2004)

(87) Публикация РСТ:
WO 2004/099456 (18.11.2004)

Адрес для переписки:
129010, Москва, ул. Б.Спасская, 25, стр.3,
ООО "Юридическая фирма Городисский и
Партнеры", пат.пов. Г.Б. Егоровой, рег.№ 513

(72) Автор(ы):

ВОЙЦИК Крэйг (US)

(73) Патентообладатель(и):

ЭЙ ТИ АЙ ПРОПЕРТИЗ, ИНК. (US)

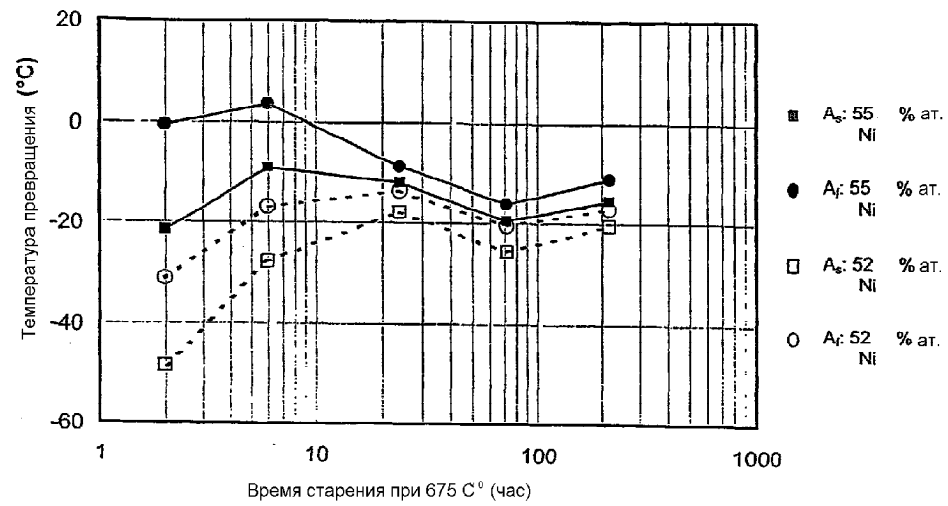
(54) СПОСОБЫ ОБРАБОТКИ НИКЕЛЬ-ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ

(57) Реферат:

Варианты осуществления настоящего изобретения предлагают способы обработки никель-титановых сплавов, содержащих от более 50 вплоть до 55 ат. % никеля, для обеспечения заданной температуры превращения аустенита или интервала температур превращения аустенита. Выбирают заданную температуру превращения аустенита или заданный интервал температур превращения аустенита и проводят термическую обработку сплава или по меньшей мере двух сплавов при температуре, обеспечивающей корректирование количества никеля в твердом растворе в TiNi фазе сплава. Содержание никеля достаточно для достижения предела

растворимости в твердом состоянии во время термической обработки. При этом достигается стабильная температура (интервал температур) превращения аустенита, которая по существу является равной заданной температуре (интервалу температур) превращения аустенита. Заданную температуру превращения аустенита выбирают в пределах от -100 до 100°C. Термическая обработка сплава включает изотермическое старение. Интервал температур превращения аустенита не превышает 10°C. Способы позволят предсказуемо регулировать температуру (интервал температур) превращения аустенита сплавов с памятью формы. 6 н. и 36 з.п. ф-лы, 2 табл., 6 ил.

Фиг. 1





FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY,
PATENTS AND TRADEMARKS

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**(21), (22) Application: **2005137319/02, 07.04.2004**(24) Effective date for property rights: **07.04.2004**(30) Priority:
01.05.2003 US 10/427,783(43) Application published: **27.04.2006**(45) Date of publication: **20.01.2009 Bull. 2**(85) Commencement of national phase: **01.12.2005**(86) PCT application:
US 2004/010758 (07.04.2004)(87) PCT publication:
WO 2004/099456 (18.11.2004)

Mail address:
**129010, Moskva, ul. B.Spasskaja, 25, str.3,
OOO "Juridicheskaja firma Gorodisskij i
Partnery", pat.pov. G.B. Egorovoj, reg.№ 513**

(72) Inventor(s):
VOJTslK Krehjg (US)(73) Proprietor(s):
EhJ TI AJ PROPERTIZ, INK. (US)(54) **METHOD OF TREATMENT OF NICKEL-TITANIUM ALLOYS WITH SHAPE MEMORY**

(57) Abstract:

FIELD: metallurgy.

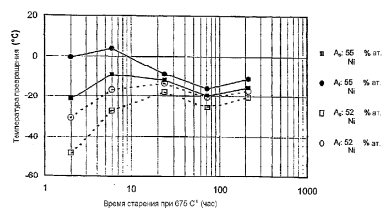
SUBSTANCE: versions of present invention suggest methods of treatment of nickel-titanium alloys containing from more, than 50 up to 55 wt % of nickel for providing a specified temperature of austenite transformation or temperature range of austenite transformation. Then the specified temperature or temperature range of austenite transformation is selected and heat treatment of the alloy or at least two alloys is performed at the temperature facilitating correction of contents of nickel in solid solution in TiNi-phase of the alloy. Contents of nickel are sufficient for achieving a solubility limit in

solid state during heat treatment. Thus a stable temperature (temperature range) of austenite transformation is obtained which in essence is equal to the specified temperature (temperature range) of austenite transformation. The specified temperature of austenite transformation is chosen within the range from -100 to 100°C. Heat treatment of the alloy includes isothermal aging. The temperature range of austenite transformation does not exceed 10°C.

EFFECT: facilitating predictable adjustment of temperature (temperature range) of austenite transformation with shape memory.

42 cl, 2 tbl, 2 ex

Фиг. 1



RU 2 3 4 4 1 9 6 C 2

RU 2 3 4 4 1 9 6 C 2

Предпосылки изобретения**Область техники, к которой относится изобретение**

Различные варианты осуществления настоящего изобретения в основном относятся к способам обработки никель-титановых сплавов. Более конкретно, определенные варианты осуществления настоящего изобретения относятся к термической обработке никель-титановых сплавов для предсказуемого корректирования температуры превращения аустенита и/или интервала температур превращения сплава.

Описание предшествующего уровня техники

Известно, что эквиатомные и почти эквиатомные никель-титановые сплавы обладают как свойством «памяти формы», так и «суперэластичными» свойствами. Более конкретно, известно, что эти сплавы, которые обычно называются сплавами «нитинол», подвергают мартенситному превращению из исходной фазы (обычно называемой аустенитной фазой) в, по меньшей мере, одну мартенситную фазу при охлаждении до температуры ниже начальной мартенситной (или M_s) температуры сплава. Это превращение является полным при охлаждении до конечной мартенситной (или M_f) температуры сплава. Дополнительно, превращение является обратимым при нагревании материала до температуры выше его конечной аустенитной (или A_f) температуры. Это обратимое мартенситное превращение вызывает свойства запоминания формы сплава. Например, никель-титановый сплав может быть отформован в первую форму во время аустенитной фазы (т.е. выше конечной аустенитной, или A_f , температуры сплава) и потом охлажден до температуры ниже M_f и сформован во вторую форму. До тех пор, пока материал остается ниже A_s сплава (т.е. температуры, при которой начинается переход в аустенит, или начальной температуры аустенита), сплав будет сохранять вторую форму. Однако если сплав нагревают до температуры выше A_f , то сплав будет возвращаться к первой форме.

Превращение между фазами аустенита и мартенсита также вызывает «суперэластичные» свойства никель-титановых сплавов. Когда никель-титановый сплав деформируют при температуре выше M_s , то сплав может подвергаться деформационному превращению из фазы аустенита в фазу мартенсита. Это превращение, соединенное со способностью фазы мартенсита деформироваться путем движения сдвоенных границ без размножения дислокаций, позволяет никель-титановому сплаву поглощать большое количество энергии деформации путем упругой деформации без пластического деформирования (т.е. надолго). Когда напряжение удаляют, сплав способен почти полностью вернуться до его ненапряженного состояния.

Возможность коммерчески воспользоваться уникальными свойствами никель-титановых сплавов и других сплавов с памятью формы в значительной степени зависит от температур, при которых эти превращения имеют место, т.е. A_s и A_f , M_s и M_f сплава, а также интервала температур, вблизи которых эти превращения имеют место. Однако было замечено, что в бинарных системах никель-титанового сплава температуры превращения сплава очень зависят от состава. То есть, например, было замечено, что M_s температура никель-титанового сплава может изменяться на более 100 K при изменении на 1 атомный процент в составе сплава. Смотри К.Отцука (Otsuka) и Т.Какешиа (Kakeshia), "Science and Technology of Shape-Memory Alloys: New Developments", MRS Bulletin, февраль 2002, стр.91-100.

Дополнительно, как будет понятно специалистам в этой области техники, жесткий контроль состава никель-титановых сплавов, необходимый для достижения предсказуемых температур превращения, является чрезвычайно трудным для выполнения. Например, для того, чтобы достигнуть желательной заданной температуры превращения в типичном никель-титановом сплаве после того, как отлит слиток или заготовка, температура превращения слитка должна быть измерена. Если температура превращения не является желательной температурой превращения, то состав слитка должен быть скорректирован путем переплава и легирования слитка. Дополнительно, если слиток композиционно сегрегирован, что может иметь место, например, во время затвердевания слитка, то температура превращения нескольких областей поперек слитка должна быть измерена, и

температура превращения в каждой области должна быть скорректирована. Этот процесс должен повторяться до тех пор, пока не достигнут желательной температуры превращения. Как будет понятно специалистам в этой области техники, подобные способы регулирования температуры превращения путем регулирования состава являются одновременно

5 трудоемкими и дорогими. Используемый в настоящем описании термин «температура(ы) превращения» относится в основном к любой из температур превращения, обсужденных выше, тогда как термин «температура(ы) превращения аустенита» относится к, по меньшей мере, одной из аустенитной начальной (A_s) или аустенитной конечной (A_f) температуре сплава, если не указано конкретно.

10 Способы общепринятого повышения или понижения температур превращения никель-титанового сплава с использованием термических процессов известны в данной области техники. Например, патент США № 5882444 (Flomenblit et al.) раскрывает обработку
запоминания для двустороннего сплава с памятью формы, которая включает формование
15 никель-титанового сплава в форму, принятую в аустенитной фазе, и затем полигонизацию
сплава путем нагревания при 450-550°C в течение от 0,5 до 2 часов, обработку сплава
раствором при 600-800°C в течение от 2 до 50 минут и, наконец, старение при примерно
350 -500°C в течение от примерно 0 до 2,5 часов. Согласно Flomenblit et al. после этой
20 обработки сплав должен иметь A_f , заключающуюся в пределах 10-60°C, и интервал
температур превращения (т.е. A_f-A_s) - от 1 до 5°C. Затем A_f сплава может быть повышена
путем старения сплава при температуре примерно 350-500°C. Альтернативно, сплав может
быть обработан раствором при температуре примерно 510-800°C для снижения A_f сплава.
Смотри Flomenblit et al., в графе 3, строки 47-53.

Патент США № 5843244 (Pelton et al.) раскрывает способ обработки детали,
25 отформованной из никель-титанового сплава, для снижения A_f сплава путем выдерживания
детали до температуры, большей той, до которой выдерживают сплав фиксированной
формы, и меньшей температуры растворения избыточной фазы сплава в течение более 10
минут для уменьшения A_f сплава.

Однако остается необходимость в эффективном способе предсказуемого регулирования
30 температур превращения аустенита и/или интервала температур превращения аустенита
никель-титановых сплавов для достижения желательной температуры превращения
аустенита и/или интервала температур превращения аустенита. Дополнительно, остается
необходимость в способе предсказуемого регулирования температур превращения
аустенита и интервала температур превращения аустенита никель-титановых сплавов,
35 имеющих изменяющиеся содержания никеля.

Краткое раскрытие изобретения

Варианты осуществления настоящего изобретения предлагают способы обработки
никель-титановых сплавов для достижения желательной температуры превращения
аустенита. Например, один неограничивающий способ обработки никель-титанового
40 сплава, содержащего от более 50 вплоть до 55% никеля, для обеспечения желательной
температуры превращения аустенита включает выбор желательной температуры
превращения аустенита и термическую обработку никель-титанового сплава для
корректирования количества никеля в твердом растворе в TiNi фазе сплава таким
образом, что стабильная температура превращения аустенита достигается во время
45 термической обработки никель-титанового сплава, при этом стабильная температура
превращения аустенита по существу равна желательной температуре превращения
аустенита.

Другой неограничивающий способ обработки никель-титанового сплава для обеспечения
желательной температуры превращения аустенита включает выбор никель-титанового
50 сплава, содержащего от более 50 вплоть до 55% никеля, выбор желательной температуры
превращения аустенита и термическую обработку выбранного никель-титанового сплава
для корректирования количества никеля в твердом растворе в TiNi фазе сплава таким
образом, что стабильная температура превращения аустенита достигается во время
термической обработки выбранного никель-титанового сплава, причем стабильная

температура превращения аустенита по существу равна желательной температуре превращения аустенита, при этом выбранный никель-титановый сплав содержит достаточно никеля для достижения предела растворимости в твердом состоянии во время термической обработки выбранного никель-титанового сплава.

5 Кроме того, другой неограничивающий способ обработки двух или более никель-титановых сплавов, имеющих изменяющиеся составы, содержащих от более 50 вплоть до 55% никеля, для достижения желательной температуры превращения аустенита включает выбор желательной температуры превращения аустенита и подвергания никель-титановых сплавов подобной термической обработке таким образом, что после термической
10 обработки никель-титановые сплавы имеют стабильные температуры превращения аустенита, причем стабильные температуры превращения аустенита по существу равны желательной температуре превращения аустенита.

Другой неограничивающий способ обработки никель-титанового сплава, включающего области изменяющегося состава, содержащего от более 50 вплоть до 55% никеля, так что
15 каждая область имеет желательную температуру превращения аустенита, включает термическую обработку никель-титанового сплава для корректирования количества никеля в твердом растворе в TiNi фазе сплава в каждой области никель-титанового сплава, при этом после термической обработки никель-титанового сплава каждая из областей никель-титанового сплава имеет стабильную температуру превращения аустенита, которая по
20 существу равна желательной температуре превращения аустенита.

Варианты осуществления настоящего изобретения также предлагают способы обработки никель-титанового сплава для достижения желательного температурного интервала превращения аустенита. Например, один неограничивающий способ обработки никель-титанового сплава, содержащего от более 50 вплоть до 55% никеля, для
25 достижения желательного интервала температур превращения аустенита включает изотермическое старение никель-титанового сплава в печи при температуре в пределах от 500°C до 800°C в течение, по меньшей мере, 2 часов, при этом после старения никель-титановый сплав имеет интервал температур превращения аустенита не более 15°C.

Другой неограничивающий способ обработки никель-титанового сплава, включающего
30 области с изменяющимся составом, содержащего от более 50 вплоть до 55% никеля таким образом, что каждая область имеет желательный интервал температур, включает изотермическое старение никель-титанового сплава для корректирования количества никеля в твердом растворе в TiNi фазе сплава в каждой области никель-титанового сплава, при этом после изотермического старения никель-титанового сплава каждая из
35 областей никель-титанового сплава имеет интервал температур превращения аустенита не более 15°C.

Кроме того, другой неограничивающий способ обработки никель-титанового сплава, содержащего от более 50 до 55% никеля, для достижения желательного интервала температур превращения аустенита включает изотермическое старение никель-титанового
40 сплава в печи при первой температуре старения для достижения стабильной температуры превращения аустенита и изотермическое старение никель-титанового сплава при второй температуре старения, которая отличается от первой температуры старения, при этом после старения при второй температуре старения никель-титановый сплав имеет интервал температур превращения аустенита, который по существу равен желательному
45 температурному интервалу превращения аустенита.

Краткое описание нескольких видов чертежей

Различные варианты осуществления настоящего изобретения будут лучше понятны при чтении в соединении с чертежами.

50 Фигура 1 является графической зависимостью: «температура превращения аустенита - время старения» при температуре 675°C для двух различных никель-титановых сплавов.

Фигура 2 является графической зависимостью: «стабильная температура превращения аустенита - температура старения» для двух различных никель-титановых сплавов.

Фигура 3 является графической зависимостью: «температура превращения аустенита -

время старения» при 566°C для двух различных никель-титановых сплавов.

Фигура 4 является кривой дифференциальной сканирующей калориметрии (DSC) никель-титанового сплава после 2 часов старения при 650°C.

5 Фигура 5 является кривой DSC никель-титанового сплава после 24 часов старения при 650°C.

Фигура 6 является кривой DSC никель-титанового сплава после 216 часов старения при 650°C.

Детальное описание изобретения

10 Как обсуждено предварительно, температуры превращения аустенита большей части никель-титановых сплавов обычно корректируют путем корректирования состава сплава. Однако, так как температуры превращения аустенита никель-титановых сплавов являются чувствительными к незначительным композиционным изменениям, то попытки регулирования температур превращения аустенита через состав доказали их трудоемкость и дороговизну. Более того, при этом масса сплава является композиционно сегрегированной, что может иметь место, например, во время затвердевания, 15 корректирование температур превращения аустенита сплава может потребовать многочисленных композиционных корректировок. Напротив, способы обработки никель-титановых сплавов согласно различным вариантам осуществления настоящего изобретения могут быть выгодны для обеспечения эффективных способов предсказуемого регулирования температур превращения аустенита и/или интервала температур превращения аустенита никель-титановых сплавов для достижения желательной температуры превращения аустенита и/или интервала температур превращения аустенита без необходимости композиционных корректировок. Дополнительно, способы согласно различным вариантам осуществления настоящего изобретения могут быть выгодными для 20 обеспечения эффективных способов предсказуемого регулирования температур превращения аустенита и/или интервала температур превращения аустенита для никель-титановых сплавов с изменяющимися содержаниями никеля, например, если большая часть сплава композиционно сегрегирована, или где различные сплавы обрабатываются одновременно. Другие преимущества способов обработки никель-титановых сплавов 25 согласно определенным вариантам осуществления настоящего изобретения могут включать улучшенные свойства в отношении прочности на растяжение и твердости сплавов.

Будет понятно специалистам в этой области техники, что A_s и A_f никель-титановых сплавов в основном можно корректировать путем воздействия на никель-титановый сплав 35 повышенной температуры в течение относительно коротких периодов времени. Например, если сплав подвергают воздействию температуры, достаточной, чтобы вызвать образование осадков, богатых никелем, то температуры превращения сплава обычно будут повышаться. Напротив, если сплав подвергают воздействию температуры, достаточной, чтобы вызвать растворение осадков, богатых никелем (т.е. никель переходит в твердый раствор в TiNi фазу), то температура превращения сплава обычно будет понижаться. 40

Однако было обнаружено, что степень повышения или понижения температур превращения аустенита во время термической обработки будет зависеть от нескольких факторов, включающих, но не в качестве ограничения, исходные A_s и A_f сплава, общий состав сплава, а также время и температуру, воздействию которой он подвергается. 45 Например, обратимся теперь к фигуре 1, где показана графическая зависимость «температура превращения аустенита (A_s и A_f) - время старения» при 675°C для двух никель-титановых сплавов, одного, содержащего 55% никеля (изображенного темными кружками и квадратами), и другого, содержащего 52% никеля (изображенного светлыми кружками и квадратами). Как видно из графической зависимости на фигуре 1, при 50 старении этих сплавов в течение 2 часов A_s и A_f для обоих сплавов меняются существенно с увеличением времени старения. Однако после 24 часов старения изменения в A_s (изображены на фигуре 1 квадратами) и A_f (изображены на фигуре 1 кружочками) для обоих сплавов с увеличением времени старения являются относительно маленькими.

Например, после 216 часов старения температуры превращения аустенита только незначительно отклоняются от температур превращения аустенита, наблюдаемых после 24 часов старения. Другими словами, оказывается, что после старения этих сплавов при 675°C в течение 24 часов достигаются стабильные температуры превращения аустенита (как A_s , так и A_f). Используемый в настоящем описании термин «стабильная температура превращения аустенита» означает, что, по меньшей мере, одна из аустенитной начальной (A_s) и аустенитной конечной (A_f) температур никель-титанового сплава, полученного после термической обработки, отклоняется не более чем на 10°C при термической обработке никель-титанового сплава в тех же условиях в течение дополнительных 8 часов.

Например, хотя здесь не в качестве ограничения, после старения сплава с 55 атомными (ат.) процентами никеля (55 ат.% Ni) при 675°C в течение 24 часов никель-титановый сплав имеет A_s примерно -12°C и сплав с 52 атомными процентами никеля (52 ат.% Ni) имеет A_s примерно -18°C. После старения сплава с 55 ат.% Ni при 675°C в течение 24 часов никель-титановый сплав имеет A_f примерно -9°C и сплав с 52 ат.% Ni имеет A_f примерно -14°C. Когда эти сплавы стареют в течение 216 часов при 675°C, то ни A_s , ни A_f отдельных сплавов не отклоняется более чем на 10°C от A_s или A_f сплавов, зарегистрированных после 24 часов старения. В этом конкретном неограничивающем примере A_s и A_f отдельных сплавов после старения в течение 216 часов при 675°C отклоняются на менее чем примерно 5°C от A_s и A_f сплавов, наблюдаемых после 24 часов старения при 675°C.

Как обсуждено ниже более детально, и пока не намереваясь ограничиваться какой-либо конкретной теорией, автор изобретения полагает, что изменчивость A_s и A_f сплавов после старения в течение 2 часов можно в значительной степени приписать невозможности достигнуть композиционного равновесия или почти равновесных условий в этих сплавах во время этой, относительно кратковременной, термической обработки. Таким образом, как можно видеть из графической зависимости на фигуре 1, в то время как неравновесные термические обработки могут быть использованы, в основном, для повышения (или понижения) температуры превращения аустенита сплава, но они не особенно полезны в осуществлении предсказуемых корректировок температуры превращения аустенита сплава для того, чтобы достигнуть желательной температуры превращения аустенита.

Обращаясь опять к фигуре 1, можно видеть, что температуры превращения аустенита сплавов зависят от состава при старении сплавов в течение менее примерно 24 часов. Например, после 2 часов старения при 675°C A_s сплава с 55 ат.% Ni выше на примерно 27°C, чем A_s сплава с 52 ат.% Ni; и A_f сплава с 55 ат.% Ni выше на примерно 30°C, чем A_f сплава с 52 ат.% Ni. Даже после 6 часов старения при 675°C A_s сплава с 55 ат.% Ni выше на примерно 19°C, чем A_s сплава с 52 ат.% Ni, в то время как A_f сплава с 55 ат.% Ni выше на примерно 30°C, чем A_f сплава с 52 ат.% Ni. Однако после примерно 24 часов старения при 675°C разница между A_s сплава с 55 ат.% Ni и ею же сплава с 52 ат.% Ni заметно уменьшается, так же как и разница между A_f для обоих сплавов. Хотя, не в качестве ограничения, в этом конкретном примере после 24 часов старения при 675°C разница между начальными температурами аустенита двух сплавов составляет только примерно 6°C, тогда как разница между конечными температурами аустенита двух сплавов составляет примерно 5°C.

Таким образом, оказывается, что температуры превращения аустенита, достигнутые после старения этих двух сплавов в течение примерно 24 часов при 675°C, являются независимыми от общего состава сплава. Используемый здесь термин «независимый от общего состава» означает, что, по меньшей мере, одна из начальной (A_s) или конечной (A_f) температур аустенита никель-титанового сплава после термической обработки находится в пределах 10°C для любого другого никель-титанового сплава, аналогичным образом обработанного и имеющего достаточно никеля для достижения предела растворимости в твердом состоянии во время термической обработки, как обсуждено ниже более детально.

Следовательно, как можно видеть из графической зависимости на фигуре 1, хотя могут быть использованы относительно кратковременные термические обработки для создания существенных изменений в температурах превращения аустенита никель-титановых сплавов (т.е., в основном, повышение или снижение температур превращения аустенита),
 5 но они не особенно полезны в осуществлении предсказуемых корректировок до температур превращения аустенита никель-титановых сплавов для того, чтобы достигнуть желательной температуры превращения аустенита, которая является независимой от общего состава сплава.

Как обсуждено предварительно, автор изобретения полагает, что изменчивость,
 10 связанная с относительно кратковременными термическими обработками, может быть в значительной степени приписана неравновесным условиям, достигнутым в сплаве во время термической обработки. Однако было обнаружено, что предсказуемые и стабильные температуры превращения, в частности температуры превращения аустенита, могут быть достигнуты путем термической обработки никель-титановых сплавов для достижения
 15 композиционного равновесия или почти равновесного состояния в сплаве. Более конкретно, было обнаружено, что никель-титановые сплавы могут быть термически обработаны для достижения стабильной температуры превращения аустенита, которая является признаком температуры, при которой материал является термически обработанным, при условии, что никель-титановый сплав имеет достаточно никеля для
 20 достижения предела растворимости никеля в твердом состоянии (обсуждено ниже) в TiNi фазе при температуре термической обработки. Хотя, не имея в виду ограничиться какой-либо конкретной теорией или ограничить настоящее изобретение, полагают, что стабильные температуры превращения аустенита, наблюдаемые после термической обработки никель-титановых сплавов при заданной температуре, являются признаком
 25 равновесного или почти равновесного количества никеля в твердом растворе в TiNi фазе при температуре термической обработки.

Хотя, здесь не в качестве ограничения, будет признано специалистами в этой области техники, что в бинарных никель-титановых сплавах максимальное количество никеля, которое может существовать в стабильном твердом растворе в TiNi фазе, изменяется с
 30 температурой. Другими словами, предел растворимости никеля в твердом состоянии изменяется с температурой. Используемый здесь термин «предел растворимости в твердом состоянии» означает максимальное количество никеля, которое остается в TiNi фазе при данной температуре. Другими словами, предел растворимости в твердом состоянии является равновесным количеством никеля, которое может существовать в
 35 твердом растворе в TiNi фазе при данной температуре. Например, не в качестве ограничения в настоящем описании, как будет понятно специалистам в этой области техники, обычно предел растворимости никеля в твердом состоянии в TiNi фазе задается кривой растворимости твердого раствора, отделяющей фазовые области TiNi и TiNi + TiNi₃ в диаграмме фазового равновесия Ti-Ni. Смотри ASM Materials Engineering Dictionary,
 40 J.R. Davis, ed. ASM International, 1992, стр. 432, что включено в описание посредством ссылки. Неограничивающий пример одной TiNi фазовой диаграммы показан в работе K.Otsuka and T.Kakeshia на стр.96. Однако альтернативные способы определения предела растворимости никеля в твердом состоянии в TiNi фазе будут очевидны
 специалистам в этой области техники.

Будет также понятно специалистам в этой области техники, что, если количество никеля в TiNi фазе превышает предел растворимости никеля в твердом состоянии в TiNi фазе (т.е. TiNi фаза является перенасыщенной никелем) при данной температуре, то никель будет иметь тенденцию к осаждению из раствора с образованием одного или более
 45 осадков, обогащенных никелем, таким образом, снижая перенасыщение. Однако так как скорости диффузии в системе Ti-Ni могут быть медленными, то перенасыщение не снижается мгновенно. Взамен может потребоваться существенное время для достижения равновесных состояний в сплаве. Наоборот, если количество никеля в TiNi фазе
 50 составляет менее предела растворимости в твердом состоянии при данной температуре,

то никель будет диффундировать в TiNi фазу до тех пор, пока не будет достигнут предел растворимости в твердом состоянии. К тому же потребуется существенное время для достижения равновесных состояний в сплаве.

Дополнительно, когда никель осаждается из TiNi фазы, чтобы образовать богатые никелем осадки, то как прочность, так и предел прочности на растяжение сплава могут быть повышены благодаря присутствию никелевых осадков, распределенных по всему сплаву. На это повышение прочности обычно ссылаются как на «упрочнение при старении» или «дисперсионное твердение». Смотри ASM Materials Engineering Dictionary, стр.339.

Как обсуждено предварительно, на температуры превращения никель-титанового сплава сильно влияет состав сплава. В частности, было найдено, что количество никеля в растворе в TiNi фазе никель-титанового сплава будет сильно влиять на температуры превращения сплава. Например, было найдено, что M_s никель-титанового сплава будет обычно понижаться с увеличением количеств никеля в твердом растворе в TiNi фазе сплава, тогда как M_s никель-титанового сплава будет обычно повышаться с уменьшением количеств никеля в твердом растворе в TiNi фазе сплава. Смотри R. J. Wasilewski et al., "Homogeneity Range and the Martensitic Transformation in TiNi", Metallurgical Transactions, том 2, январь 1971, стр. 229-238.

Однако, хотя не имея в виду ограничиться какой-либо конкретной теорией, автор изобретения полагает, что когда равновесное или почти равновесное количество никеля существует в твердом растворе в TiNi фазе никель-титанового сплава при данной температуре, то сплав будет иметь стабильную температуру превращения аустенита, которая является признаком данной температуры, невзирая на общий состав сплава. Другими словами, поскольку достаточно никеля присутствует в никель-титановом сплаве для достижения предела растворимости никеля в твердом состоянии в TiNi фазе сплава при данной температуре термической обработки, то все никель-титановые сплавы должны иметь по существу такую же температуру превращения аустенита после термической обработки сплавов при конкретной температуре термической обработки для достижения равновесного или почти равновесного количества никеля в твердом растворе в TiNi фазе сплавов при температуре термической обработки. Поэтому стабильная температура превращения аустенита, достигнутая после термической обработки никель-титанового сплава, является признаком равновесного или почти равновесного количества никеля в твердом растворе в TiNi фазе сплава при конкретной температуре термической обработки.

Следовательно, хотя здесь не в качестве ограничения, так как количество никеля в твердом растворе в TiNi фазе никель-титанового сплава достигает равновесного количества (т.е. предела растворимости в твердом состоянии) при данной температуре, то температура превращения аустенита сплава будет меньше колебаться от дополнительной термической обработки при этой температуре. Другими словами, будет наблюдаться стабильная температура превращения аустенита, которая является признаком композиционного равновесного или почти равновесного состояния в сплаве.

Будет понятно специалистам в этой области техники, что, если после термической обработки сплав охлаждают слишком медленно до комнатной температуры, то равновесные или почти равновесные состояния, достигнутые во время термической обработки, могут быть потеряны. Соответственно, обычно желательно охлаждать никель-титановые сплавы после термической обработки достаточно быстро для сохранения равновесных или почти равновесных состояний, достигнутых во время термической обработки. Например, после термической обработки сплава он может быть охлажден воздухом, жидкостной закалкой или воздушной закалкой.

Обратимся теперь к фигуре 2, где показана графическая зависимость «стабильная температура превращения аустенита - температура старения» для двух никель-титановых сплавов, содержащих изменяющиеся количества никеля. Два никель-титановых сплава были изотермически состарены при указанных температурах в течение примерно 24 часов для того, чтобы достигнуть стабильной температуры превращения аустенита. Как обсуждено выше, стабильные температуры превращения являются признаком

равновесного или почти равновесного количества никеля в твердом растворе в TiNi фазе сплавов при температуре термической обработки.

Дополнительно, как можно видеть из графической зависимости на фигуре 2, возможно термически обрабатывать никель-титановый сплав для достижения желательной

5 температуры превращения аустенита путем выбора температуры термической обработки, имеющую связанную с ней стабильную температуру превращения аустенита, по существу равную желательной температуре превращения аустенита, и затем путем термической обработки никель-титанового сплава при этой температуре для достижения стабильной температуры превращения аустенита. Так как стабильная температура превращения
10 аустенита для данной температуры термической обработки может быть легко определена (например, путем исследований изотермического старения), то возможно предсказуемо корректировать A_s и A_f никель-титановых сплавов путем термической обработки никель-титановых сплавов для достижения композиционных равновесных или почти равновесных состояний в сплаве. Дополнительно, до тех пор, пока содержание никеля в сплаве
15 является достаточным для достижения предела растворимости в твердом состоянии при выбранной температуре термической обработки, достигнутая стабильная температура превращения аустенита будет независимой от общего состава сплава. Используемый здесь, по отношению к температурам превращения, термин «по существу равный» означает, что температуры превращения находятся в пределах 10°C или меньше друг от
20 друга. Поэтому, хотя не требуется, температуры превращения, которые по существу равны друг другу, могут быть равными друг другу.

Теперь будут описаны различные, неограничивающие, варианты осуществления настоящего изобретения. Будет понятно специалистам в этой области техники, что способы согласно определенным вариантам осуществления настоящего изобретения могут
25 быть использованы в соединении с множеством систем никель-титанового сплава, так же как и с системами другого сплава, имеющих свойства, чувствительные к минимальным композиционным изменениям; однако, для ясности, аспекты настоящего изобретения были описаны со ссылкой на бинарные системы никель-титанового сплава. Хотя здесь не в качестве ограничения, полагают, что способы согласно определенным вариантам осуществления настоящего изобретения являются полезными в обработке бинарных,
30 тройных и четвертных систем сплава, включающих никель и титан в соединении с, по меньшей мере, одним другим легирующим элементом. Например, тройные системы никель-титанового сплава считаются пригодными для включения в различные варианты осуществления настоящего изобретения, но не ограничивающими его, системы сплава
35 никель-титан-гафний; никель-титан-медь; никель-титан-железо.

В одном неограничивающем варианте осуществления настоящего изобретения никель-титановый сплав, содержащий от более 50 вплоть до 55% никеля, термически обрабатывают для обеспечения желательной температуры превращения аустенита. Более конкретно, согласно этому варианту осуществления настоящего изобретения способ
40 включает выбор желательной температуры превращения аустенита и термическую обработку никель-титанового сплава для регулирования количества никеля в твердом растворе в TiNi фазе сплава таким образом, что стабильная температура превращения аустенита, которая по существу равна желательной температуре превращения аустенита, достигается во время термической обработки. Дополнительно, как обсуждено выше, до тех
45 пор, пока количество никеля, присутствующего в никель-титановом сплаве, является достаточным для достижения предела растворимости в твердом состоянии при температуре термической обработки, достигнутая температура превращения аустенита может быть независимой от общего состава сплава. Дополнительно, хотя и не требуется, согласно этому неограничивающему варианту осуществления желательная температура превращения аустенита может находиться в пределах от примерно -100°C до примерно
50 100°C.

Хотя не предназначено для ограничения, полагают, что влияние термической обработки на температуру превращения аустенита никель-титановых сплавов, содержащих 50% или

менее никеля, является слишком маленьким, чтобы быть полезным в промышленном масштабе, тогда как никель-титановые сплавы, имеющие более 55% никеля, считаются слишком хрупкими для промышленной обработки. Однако специалисты в этой области техники могут знать определенные применения, для которых желательны никель-

5 титановые сплавы, содержащие более 55% никеля. В таких случаях сплавы, содержащие более 55% никеля, могут быть использованы в соединении с различными вариантами осуществления настоящего изобретения. Теоретически, сплавы, содержащие вплоть до примерно 75% никеля (т.е. внутри области фазы $TiNi + TiNi_3$), должны поддаваться обработке согласно различным вариантам осуществления настоящего изобретения, однако
10 время, требуемое для термической обработки таких высоконикелевых сплавов, а также хрупкая природа этих высоконикелевых сплавов делают их не слишком пригодными для большинства промышленных применений.

Другой неограничивающий вариант осуществления способа обработки никель-титанового сплава для обеспечения желательной температуры превращения аустенита
15 согласно настоящему изобретению включает выбор никель-титанового сплава, содержащего от более 50 вплоть до 55 атомных процентов никеля, выбор желательной температуры превращения аустенита и термическую обработку выбранного никель-титанового сплава для корректирования количества никеля в твердом растворе в $TiNi$ фазе сплава таким образом, что стабильная температура превращения аустенита
20 достигается во время термической обработки, причем стабильная температура превращения аустенита по существу равна желательной температуре превращения аустенита. Согласно этому неограничивающему варианту осуществления выбранный никель-титановый сплав содержит достаточно никеля для достижения предела растворимости в твердом состоянии во время термической обработки. Дополнительно,
25 согласно этому неограничивающему варианту осуществления, стабильная температура превращения аустенита может быть независимой от общего состава сплава. Дополнительно, хотя не требуется, желательная температура превращения аустенита согласно этому неограничивающему варианту осуществления может находиться в пределах от примерно $-100^{\circ}C$ до примерно $100^{\circ}C$.

В другом неограничивающем варианте осуществления настоящего изобретения два или
30 более никель-титановых сплава, имеющие изменяющиеся составы и содержащие от более 50 вплоть до 55 атомных процентов никеля, обрабатывают так, что сплавы имеют желательную температуру превращения аустенита. Согласно этому неограничивающему варианту осуществления способ включает выбор желательной температуры превращения
35 аустенита и подвергание никель-титановых сплавов аналогичной термической обработке таким образом, что после термической обработки никель-титановые сплавы имеют стабильные температуры превращения аустенита, которые по существу являются равными желательной температуре превращения аустенита. Как обсуждено предварительно, до тех пор, пока никель-титановые сплавы имеют достаточно никеля для достижения предела
40 растворимости в твердом состоянии во время термической обработки, стабильная температура превращения аустенита сплавов будет независимой от общего состава сплавов. Дополнительно, хотя не требуется, согласно этому неограничивающему варианту осуществления желательная температура превращения аустенита может находиться в пределах от примерно $-100^{\circ}C$ до примерно $100^{\circ}C$. Используемый здесь термин
45 «аналогичная термическая обработка» означает, что никель-титановые сплавы обрабатывают либо вместе, либо обрабатывают отдельно, но используя такие же или подобные параметры обработки.

Как обсуждено предварительно, во время затвердевания никель-титанового сплава сплав может стать композиционно сегрегированным. Обычно такая композиционная
50 сегрегация приводит к различным температурам превращения по всему сплаву. Это обычно требует, чтобы отдельные композиционные корректировки были выполнены по всему сплаву для того, чтобы достигнуть равномерной температуры превращения аустенита. Как будет понятно специалистам в этой области техники, это требует

выполнения усложненных композиционных корректировок для сплава. Однако было найдено, что путем термической обработки никель-титановых сплавов, которые композиционно сегрегированны, согласно различным вариантам осуществления настоящего изобретения равномерная температура превращения аустенита по всему сплаву может быть достигнута без необходимости таких усложненных композиционных корректировок.

Соответственно, определенные варианты осуществления настоящего изобретения обеспечивают способы обработки никель-титанового сплава, включающего области с изменяющимся составом, содержащего от более 50 вплоть до 55 атомных процентов никеля таким образом, что каждая область имеет желательную температуру превращения. Более конкретно, способ включает термическую обработку сплава для корректирования количества никеля в твердом растворе в TiNi фазе в каждой области никель-титанового сплава таким образом, что после термической обработки никель-титанового сплава каждая из областей никель-титанового сплава имеет стабильную температуру превращения аустенита, которая по существу равна желательной температуре превращения аустенита.

Как обсуждено предварительно, осаждение никеля из твердого раствора в TiNi фазе с образованием богатых никелем осадков может повысить прочность никель-титанового сплава посредством дисперсионного твердения. Соответственно, в определенных вариантах осуществления настоящего изобретения, в которых богатые никелем осадки образуются во время термической обработки, термически обрабатываемые никель-титановые сплавы могут преимущественно обладать повышенным пределом прочности на растяжение и/или повышенной твердостью по сравнению со сплавами до термической обработки.

Теперь будут обсуждены пригодные, неограничивающие способы термической обработки никель-титановых сплавов согласно вышеупомянутым неограничивающим вариантам осуществления настоящего изобретения. Способы термической обработки никель-титановых сплавов согласно различным вариантам осуществления настоящего изобретения включают, но не ограничиваются, обработки изотермическим старением, многоэтапные или ступенчатые обработки старением и обработки регулируемым охлаждением. Используемый здесь термин «изотермическое старение» означает выдерживание сплава в печи при постоянной температуре печи в течение периода времени. Однако, как будет понятно специалистам в этой области техники, из-за ограничений оборудования во время обработок изотермическим старением могут иметь место минимальные колебания температуры печи.

Например, в определенных вариантах осуществления настоящего изобретения термическая обработка никель-титанового сплава включает изотермическое старение никель-титанового сплава. Как обсуждено предварительно, температура, при которой никель-титановый сплав термически обрабатывают, будет зависеть от желательной температуры превращения аустенита. Таким образом, например, в определенных неограничивающих вариантах осуществления настоящего изобретения, в которых термическая обработка никель-титанового сплава включает изотермическое старение никель-титанового сплава, температура изотермического старения может находиться в пределах от 500°C до 800°C.

Хотя, не в качестве ограничения, полагают, что, хотя изотермическое старение при температурах ниже примерно 500°C может быть использовано в соответствии с различными вариантами осуществления, но требуемое время для достижения равновесных или почти равновесных состояний при температуре старения ниже примерно 500°C обычно является слишком длительным, что ограничивает полезность для многих промышленных применений. Дополнительно, изотермическое старение при температурах выше примерно 800°C может быть использовано в соответствии с различными вариантами осуществления настоящего изобретения, однако богатые никелем сплавы, состаренные при температурах выше примерно 800°C, имеют тенденцию быть слишком хрупкими для того, чтобы быть полезными во многих промышленных применениях. Однако

специалисты в данной области техники могут знать применения, для которых температуры старения ниже примерно 500°C или выше примерно 800°C могут быть полезны.

Соответственно, варианты осуществления настоящего изобретения рассматривают термическую обработку никель-титановых сплавов при температурах ниже примерно 500°C или выше примерно 800°C.

Будет понятно специалистам в этой области техники, что требуемая продолжительность обработки изотермическим старением для достижения стабильной температуры превращения аустенита будет изменяться, отчасти завися от конфигурации (или площади поперечного сечения) сплава (т.е. бруски, проволока, плоские заготовки и т.д.), температуры старения, а также от общего содержания никеля в сплаве. Например, не в качестве ограничения, при термической обработке супертонкой никель-титановой проволоки (т.е. проволоки диаметром менее примерно 0,03 дюйма) или никель-титановой фольги могут быть использованы периоды времени изотермического старения, по меньшей мере, 2 часа в соответствии с вариантами осуществления настоящего изобретения. При изотермическом старении сплавов с большими поперечными сечениями время старения может быть более 2 часов и может быть, по меньшей мере, 24 часа или больше. Аналогичным образом, если сплавы, имеющие меньшие поперечные сечения, термически обрабатывают, то время изотермического старения может быть менее 2 часов.

Дополнительно, если общий состав никель-титанового сплава богат никелем по сравнению с пределом растворимости в твердом состоянии при температуре термической обработки и/или применяется относительно низкая температура термической обработки для достижения желательной температуры превращения аустенита, время, требуемое для достижения стабильной температуры превращения аустенита, может быть дольше, чем желательно для некоторых промышленных применений. Однако было найдено, что время, требуемое для достижения стабильной температуры превращения аустенита в очень богатых никелем сплавах и/или при низких температурах термической обработки, может быть снижено путем применения многоэтапной термической обработки, как описано ниже.

Более конкретно, согласно определенным вариантам осуществления настоящего изобретения термическая обработка никель-титанового сплава для достижения стабильной температуры превращения аустенита, которая по существу равна желательной температуре превращения аустенита, включает старение никель-титанового сплава при первой температуре старения и затем старение никель-титанового сплава при второй температуре старения, при этом первая температура старения выше второй температуры старения. Согласно этому варианту осуществления вторую температуру старения выбирают так, чтобы достигнуть желательной температуры превращения аустенита, как детально описано ниже. То есть после старения при второй температуре старения сплав будет иметь стабильную температуру превращения аустенита, которая по существу равна желательной температуре превращения и является признаком композиционного равновесного или почти равновесного состояния в сплаве при второй температуре старения.

Не намереваясь ограничиваться какой-либо конкретной теорией, первую температуру старения, которая выше второй температуры старения, но ниже температуры растворения избыточной фазы сплава, выбирают так, чтобы повысить начальную скорость диффузии никеля в сплаве. После этого желательная температура превращения аустенита достигается путем старения никель-титанового сплава при второй температуре старения, имея стабильную температуру превращения аустенита, по существу равную желательной температуре превращения. Хотя не требуется, после старения при второй температуре старения никель-титановый сплав может иметь равновесное количество никеля в твердом растворе в TiNi фазе.

Обратимся к фигуре 3, где показана графическая зависимость «температура превращения аустенита - время старения» для двух никель-титановых сплавов, которые были состарены с использованием процедуры двухэтапного старения. Хотя и не указано на диаграмме, до старения при 566°C оба сплава подвергались старению в течение примерно

24 часов при 675°C для повышения начальной скорости диффузии никеля в сплаве. Затем оба сплава подвергались старению при 566°C, как показано графической зависимостью на фигуре 3. Как можно видеть из графической зависимости на фигуре 3, после примерно 72 часов достигаются стабильные температуры A_s и A_f , которые также являются

5 независимыми от общего состава сплава. Напротив, если сплавы подвергались изотермическому старению в один этап обработки старением (т.е. только при 566°C), то потребовались бы периоды времени старения, превышающие 72 часа, для достижения стабильных температур превращения из-за относительно низкой диффузии никеля при этой температуре и относительно высокого содержания никеля.

10 В одном неограничивающем варианте осуществления двухэтапной процедуры старения согласно определенным вариантам осуществления настоящего изобретения никель-титановый сплав изотермически состарен при первой температуре старения, находящейся в пределах от 600°C до 800°C, и потом состарен при более низкой второй температуре старения, находящейся в пределах от 500°C до 600°C. Дополнительно, хотя не требуется,

15 никель-титановый сплав может быть состарен при первой температуре старения в течение, по меньшей мере, 2 часов и при второй температуре старения в течение, по меньшей мере, 2 часов. Как обсуждено предварительно, согласно этому варианту осуществления стабильная температура превращения аустенита достигается во время старения при второй температуре старения.

20 Будет также понятно специалистам в этой области техники, что, так как избыток содержания никеля никель-титанового сплава уменьшается, то движущая сила для зародыша образования богатых никелем осадков также уменьшается. Дополнительно, если для того чтобы достигнуть желательной температуры превращения аустенита, сплав термически обрабатывают при температуре близкой к температуре растворения

25 избыточной фазы сплава, то движущая сила и скорость зародыша образования богатых никелем осадков будет совсем низкой во время термической обработки. Соответственно, время, требуемое для достижения стабильной температуры превращения аустенита, которая по существу равна желательной температуре превращения аустенита, может быть

30 дольше, чем желательно для некоторых промышленных применений. Однако было найдено, что путем применения двухэтапной термической процедуры время, требуемое для достижения стабильной температуры превращения аустенита, может быть уменьшено. Более конкретно, согласно определенным вариантам осуществления настоящего изобретения термическая обработка никель-титанового сплава для достижения стабильной

35 температуры превращения аустенита, по существу равной желательной температуре превращения аустенита, включает старение никель-титанового сплава при первой температуре старения и затем старение никель-титанового сплава при второй температуре старения, при этом первая температура старения ниже второй температуры старения.

Не намереваясь ограничиваться какой-либо конкретной теорией, специалистам в этой области техники будет понятно, что движущая сила для гомогенного зародыша

40 образования богатых никелем осадков из перенасыщенной TiNi фазы может быть повышена путем снижения температуры сплава ниже температуры растворения избыточной фазы сплава, т.е. при охлаждении ниже температуры растворения избыточной фазы сплава. Таким образом, посредством использования первой температуры старения, которая ниже температуры старения, необходимой для достижения желательной

45 температуры превращения, может быть повышена скорость зародыша образования богатых никелем осадков. Однако ядра формируются при первой температуре старения, причем рост осадков (выделений) посредством диффузии никеля будет происходить быстрее, если температура старения повышается. Соответственно, после старения никель-титанового сплава при первой температуре старения никель-титановый сплав подвергают

50 старению при второй температуре старения, которая является более высокой, чем первая температура старения. Более конкретно, вторую температуру старения выбирают таким образом, что стабильная температура превращения аустенита, достигнутая во время старения при второй температуре старения, по существу равна желательной температуре

превращения аустенита.

При применении двухэтапной процедуры старения с использованием первой температуры старения, которая ниже второй температуры старения, было найдено, что общее время старения, требуемое для достижения стабильной температуры превращения аустенита, по существу равной желательной температуре превращения аустенита, может быть уменьшено. В одном конкретном неограничивающем примере процедуры двухэтапного старения согласно этому варианту осуществления настоящего изобретения никель-титановый сплав подвергают изотермическому старению при первой температуре старения, находящейся в пределах от 500°C до 600°C, и затем старению при второй температуре старения, находящейся в пределах от 600°C до 800°C. Дополнительно, хотя не требуется, никель-титановый сплав может быть состарен при первой температуре старения в течение, по меньшей мере, 2 часов и при второй температуре старения в течение, по меньшей мере, 2 часов. Как обсуждено предварительно, согласно этому варианту осуществления стабильная температура превращения аустенита достигается во время старения при второй температуре старения.

Теперь будут обсуждены способы обработки никель-титановых сплавов для достижения желательного интервала температур превращения. Как обсуждено предварительно, полезность сплавов с памятью формы зависит от температур превращения сплава, а также интервала температур превращения. Используемый здесь термин «интервал температур превращения» означает разницу между начальной и конечной температурами для данного фазового превращения для данного сплава (т.е. A_f-A_s или M_s-M_f). Используемый здесь термин «интервал температур превращения аустенита» означает разницу между A_s и A_f температурой для данного сплава (т.е. A_f-A_s). Дополнительно, используемый здесь в отношении температурных интервалов превращения термин «по существу равный» означает, что температурные интервалы превращения находятся в пределах 10°C или менее друг от друга. Поэтому, хотя не требуется, интервалы температур превращения, которые являются по существу равными друг другу, могут быть равны друг другу.

Хотя не в качестве ограничения, в некоторых применениях желателен узкий интервал температур превращения. Обычно узкий интервал температур превращения желателен в применениях, которые используют суперэластичные свойства никель-титановых сплавов, например, но не в качестве ограничения, антенный провод и оправы очков. При других применениях желателен широкий интервал температур превращения. Обычно широкий интервал температур превращения желателен в применениях, требующих различные степени превращения при различных температурах, например, но не в качестве ограничения, тепловые приводы.

Обращаясь опять к фигуре 1, можно видеть из графической зависимости для этих данных, что при увеличении времени старения интервал температур превращения аустенита как для сплава с 55 ат. % Ni, так и для сплава с 52 ат. % Ni уменьшается. Например, после старения сплава с 52 ат. % Ni в течение 2 часов при 675°C сплав имеет интервал температур превращения аустенита примерно 18°C, и после 6 часов старения - интервал температур превращения аустенита составляет примерно 11°C. Однако после 24 часов старения при 675°C сплав с 52 ат. % Ni имеет интервал температур превращения аустенита менее примерно 5°C. Дополнительно, когда время старения увеличивается свыше 24 часов, этот интервал температур превращения аустенита существенно не изменяется. Аналогичным образом, после старения сплава с 55 ат. % Ni в течение 2 часов при 675°C сплав имеет интервал температур превращения аустенита примерно 21°C, и после 6 часов старения интервал температур превращения аустенита составляет примерно 13°C. Однако после 24 часов старения при 675°C сплав с 52 ат. % Ni имеет интервал температур превращения аустенита менее примерно 5°C. Дополнительно, когда время старения увеличивается свыше 24 часов, этот интервал температур превращения аустенита существенно не изменяется.

Обратимся теперь к фигурам 4-6, где показаны три кривые дифференциальной

сканирующей калориметрии (DSC-кривые), полученные для никель-титанового сплава, содержащего 55 атомных процентов никеля. DSC-кривая на фигуре 4 была получена от сплава с 55 атомными процентами никеля, который был изотермически состарен при 650°C в течение 2 часов. DSC-кривая на фигуре 5 была получена от сплава с 55 атомными процентами никеля после изотермического старения при 650°C в течение 24 часов, и DSC-кривая на фигуре 6 была получена от сплава с 55 атомными процентами никеля после изотермического старения при 650°C в течение 216 часов.

Обратимся к фигуре 4, где верхний пик, обычно обозначаемый как 40, представляет интервал температур, выше которого мартенситное превращение имеет место при охлаждении сплава. Например, как обычно указано на фигуре 4, мартенситное превращение начинается при M_s температуре, обычно обозначаемой как 42, и заканчивается при M_f температуре, обычно обозначаемой как 44. Нижний пик, обычно обозначаемый как 45, представляет интервал температур, выше которого имеет место аустенитное превращение при нагревании сплава. Например, как указано на фигуре 4, превращение аустенита начинается при A_s температуре, обычно обозначаемой как 47, и заканчивается при A_f температуре, обычно обозначаемой как 49.

Как можно видеть из DSC-кривых на фигурах 4-6, интервалы температуры превращения как мартенсита, так и аустенита сужаются с увеличением времени старения при 650°C.

Таким образом, например, верхний пик 50 (на фигуре 5) является более острым и более узким, чем верхний пик 40 (на фигуре 4); и верхний пик 60 (на фигуре 6) является более острым и более узким, чем и верхний пик 40 и верхний пик 50. Аналогичным образом, нижний пик 55 (на фигуре 5) является более острым и более узким, чем нижний пик 45 (на фигуре 4); и нижний пик 65 (на фигуре 6) является более острым и более узким, чем и нижний пик 45, и нижний пик 55.

Как обсуждено выше, наряду с температурой превращения аустенита желательно регулирование интервала температур превращения аустенита до узкого интервала в определенных применениях. Поэтому определенные варианты осуществления настоящего изобретения предлагают способы обработки никель-титанового сплава, содержащего от более 50 вплоть до 55 атомных процентов никеля, для достижения желательного интервала температур превращения аустенита. Более конкретно, способы включают изотермическое старение никель-титанового сплава в печи при температуре, находящейся в пределах от 500°C до 800°C в течение 2 часов, при этом после изотермического старения никель-титановый сплав имеет интервал температур превращения аустенита не более 15°C. Хотя не требуется, согласно этому неограничивающему варианту осуществления время старения может составлять, по меньшей мере, 3 часа, по меньшей мере, 6 часов и может составлять, по меньшей мере, 24 часа, завися, между прочим, от желательного интервала температур превращения аустенита. Дополнительно, согласно этому неограничивающему варианту осуществления интервал температур превращения аустенита, достигнутый после изотермического старения, может составлять не более 10°C и может составлять не более 6°C, завися, отчасти, от условий изотермического старения.

Дополнительно, как обсуждено предварительно, никель-титановые сплавы могут стать композиционно сегрегированными во время затвердевания. Поэтому различные варианты осуществления настоящего изобретения также предусматривают способы обработки никель-титановых сплавов, включающих области с изменяющимся составом, содержащих от более 50 вплоть до 55 атомных процентов никеля таким образом, что каждая область имеет желательный интервал температур превращения аустенита. Согласно этим вариантам осуществления способ включает изотермическое старение никель-титанового сплава для корректирования количества никеля в твердом растворе в TiNi фазе в каждой области никель-титанового сплава, при этом после изотермического старения никель-титанового сплава каждая из областей никель-титанового сплава имеет интервал температур превращения аустенита не более 15°C. Хотя не требуется, согласно этому неограничивающему варианту осуществления время старения может составлять, по

меньшей мере, 2 часа, по меньшей мере, 3 часа, по меньшей мере, 6 часов и, по меньшей мере, 24 часа, завися, между прочим, от желательного интервала температур превращения аустенита. Дополнительно, согласно этому неограничивающему варианту осуществления интервал температур превращения аустенита, достигнутый после изотермического старения, может составлять не более 10°C и может составлять не более 6°C, завися, отчасти, от условий изотермического старения.

Как обсуждено предварительно, наряду с температурами превращения аустенита желательно регулирование интервала температур превращения аустенита в широком диапазоне для определенных применений. Соответственно, определенные варианты осуществления настоящего изобретения предлагают способы обработки никель-титанового сплава, содержащего от более 50 вплоть до 55 атомных процентов никеля, для достижения желательной температуры превращения аустенита и желательного интервала температур превращения. Более конкретно, способ включает старение никель-титанового сплава в печи при первой температуре старения для достижения стабильной температуры превращения аустенита и затем старение никель-титанового сплава при второй температуре старения, которая является более низкой, чем первая температура старения, при этом после старения никель-титанового сплава при второй температуре старения никель-титановый сплав имеет интервал температур превращения аустенита, который по существу равен желательному интервалу температур превращения аустенита.

Дополнительно, согласно неограничивающему варианту осуществления интервал температур превращения, достигнутый при старении при второй температуре старения, больше температуры превращения аустенита, достигнутой при старении никель-титанового сплава при первой температуре старения.

В другом неограничивающем варианте осуществления настоящего изобретения способ обработки никель-титанового сплава, содержащего от более 50 вплоть до 55 атомных процентов никеля, для достижения желательного интервала температур включает старение никель-титанового сплава в печи при первой температуре старения для достижения стабильной температуры превращения аустенита и затем старение никель-титанового сплава при второй температуре старения, которая выше первой температуры старения, при этом после старения при второй температуре старения никель-титановый сплав имеет интервал температур превращения аустенита, который по существу равен желательному интервалу температур превращения аустенита. Дополнительно, согласно этому неограничивающему варианту осуществления интервал температур превращения, достигнутый при старении при второй температуре старения больше температуры превращения аустенита, достигнутой при старении никель-титанового сплава при первой температуре старения.

Различные варианты осуществления настоящего изобретения будут теперь проиллюстрированы следующими, неограничивающими примерами.

Примеры

Пример 1

Два никель-титановых сплава, один - содержащий приблизительно 52 атомных процента никеля и один - содержащий приблизительно 55 атомных процентов никеля, были приготовлены, как изложено ниже. Чистые никелевые и титановые лигатуры, необходимые для каждого сплава, были взвешены и помещены в вакуумную дуговую электропечь для переплава. Затем сплавы были выплавлены и потом отлиты в прямоугольную пластину. После отливки каждый никель-титановый сплав был подвергнут горячей обработке для измельчения зернистой структуры. Затем были сделаны попытки измерить температуры превращения аустенита сплава (как A_s , так и A_f) до каких-либо обработок старением. Однако так как сплавы были композиционно сегрегированы, то температуры превращения аустенита не могли быть определены. После этого образцы каждого сплава были изотермически состарены в печи в течение периодов времени и при температурах, показанных в таблице 1.

После каждого промежутка времени старения были определены температуры

превращения аустенита для каждого сплава с использованием испытания на упругое свободное возвращение формы после деформации (bend free recovery test), которое было проведено, как изложено ниже. Первоначально плоский испытываемый образец был охлажден до температуры приблизительно -196°C (т.е. ниже M_s сплава) путем погружения

5 образца в жидкий азот. После этого образец был деформирован в перевернутую U-образную форму с использованием оправки, которая также была охлаждена погружением в жидкий азот. Диаметр оправки был выбран согласно следующему уравнению:

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

где D_m - диаметр оправки, T - толщина образца и ε - желательный процент деформации, здесь - три процента. После этого образец перевернутой U-образной формы был помещен прямо под датчик линейного дифференциального переменного трансформатора (LVDT (linear variable differential transformer)) в ванну с метанолом и жидким азотом, имеющую температуру приблизительно на 10°C ниже предполагаемой A_s сплава. Ванну, содержащую образец и LVDT-датчик, затем нагревали, используя горячую плиту. Как

15 только образец в ванне нагрелся, он начал возвращаться назад к своей первоначальной форме (т.е. плоской), когда-то бывшей у образца при температуре, достигшей температуры A_s сплава. Возврат к первоначальной, плоской форме был закончен при температуре A_f сплава. Данные, соответствующие относительной деформации образца, были собраны, используя LVDT-датчик при нагревании образца, и занесены в компьютер.

20 Затем была построена кривая зависимости «деформация - температура», и температуры A_s и A_f определили на основании аппроксимации точек перегиба кривой. В частности, точки пересечения трех линий аппроксимации линейной регрессии, соответствующие трем участкам кривой, - т.е. участки низкой температуры и высокой температуры, в которых кривая зависимости «деформация - температура» имеет

25 относительно маленький наклон и промежуточный участок, в котором кривая имеет относительно большой наклон, - были использованы для приблизительного определения A_s и A_f температур образца.

Таблица 1

Температура изотермического старения	Время старения	52 ат.% Ni				55 ат.% Ni			
$^{\circ}\text{C}$	час	A_s	A_f	Интервал температур превращения аустенита		A_s	A_f	Интервал температур превращения аустенита	
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	
650	216	-21	-17	4		-16	-11	5	
	2	-88	-56	32		-12	7	19	
	6	-13	4	17		4	10	6	
	24	0	5	5		5	7	2	
725	72	3	7	4		6	10	4	
	216	10	12	2		11	17	6	

Как можно видеть из таблицы 1, путем старения любого из сплавов в течение 24 часов могут быть достигнуты стабильные температуры превращения аустенита (как A_s , так и A_f), (т.е. A_s и A_f каждого из сплавов после 24 часов старения при 675°C не отклоняются более

45 чем на 10°C при термической обработке никель-титанового сплава в тех же самых условиях в течение 8 часов).

Дополнительно, стабильные температуры превращения аустенита, достигнутые после 24 часов старения при 675°C , являются также независимыми от общего состава никель-титанового сплава. То есть A_s сплава с 55 ат.% Ni находится в пределах 10°C от A_s сплава с 52 ат.% Ni после термической обработки сплавов при 675°C в течение 24 часов; и A_f сплава с 55 ат.% Ni находится в пределах 10°C от A_f сплава с 52 ат.% Ni после термической обработки сплавов при 675°C в течение 24 часов. Предполагают, что

снижение A_s и A_f , наблюдаемое после 72 часов старения при 675°C, не является представительным и может быть приписано к колебаниям температуры печи во время старения.

Для сравнения, хотя это проявляется после старения сплавов в течение 6 часов при 675°C, A_s и A_f сплава с 52 ат.% Ni и A_s сплава с 55 ат.% Ni являются стабильными, причем температуры превращения аустенита являются независимыми от общего состава сплава. Дополнительно, после 2 часов старения при 675°C температуры превращения аустенита для обоих сплавов не являются ни стабильными, ни независимыми от общего состава сплава.

Стабильные температуры превращения (как A_s , так и A_f) могут быть также достигнуты для обоих сплавов путем старения сплавов в течение 24 часов при 650°C (т.е. A_s и A_f каждого из сплавов после примерно 24 часов старения при 650°C не отклоняются более чем на 10°C при термической обработке никель-титанового сплава в тех же самых условиях в течение дополнительных 8 часов). Дополнительно, стабильные температуры превращения, достигнутые после 24 часов старения при 650°C, являются также независимыми от общего состава никель-титанового сплава. То есть A_s сплава с 55 ат.% Ni находится в пределах 10°C от A_s сплава с 52 ат.% Ni после термической обработки сплавов при 650°C в течение 24 часов; и A_f сплава с 55 ат.% Ni находится в пределах 10°C от A_f сплава с 52 ат.% Ni после термической обработки сплавов при 650°C в течение 24 часов.

Для сравнения, хотя это проявляется после старения сплавов в течение 6 часов при 650°C, для которых A_f сплава с 52 ат.% Ni и A_s и A_f сплава с 55 ат.% Ni являются стабильными, начальные температуры аустенита не являются независимыми от общего состава. Дополнительно, после примерно 2 часов старения при 650°C только A_f сплава с 55 ат.% Ni становится стабильной, но ни A_s , ни A_f сплавов не являются независимыми от общего состава сплавов.

Хотя, не в качестве ограничения, предполагают, что первоначальное количество никеля в твердом растворе в TiNi фазе в сплаве с 55 ат.% Ni перед старением было более близким к пределу растворимости никеля в твердом состоянии в TiNi фазе при 650°C, чем для сплава с 52 ат.% Ni, поэтому время старения при 650°C, требуемое для достижения стабильных температур превращения аустенита для сплава с 55 ат.% Ni, было меньше, чем для сплава с 52 ат.% Ni. Однако, как показывает таблица 1, температуры превращения аустенита, которые обе являются стабильными и независимыми от общего состава сплава, могут быть достигнуты путем старения сплавов в течение 24 часов при 650°C. Поэтому может быть использована та же самая термическая обработка для обоих сплавов, безотносительно к первоначальному состоянию сплава.

Дополнительно, как показывает таблица 1, стабильные температуры превращения (A_s и A_f), достигнутые после старения никель-титановых сплавов в течение 24 часов при 675°C, являются более низкими, чем стабильные температуры превращения, достигнутые после старения никель-титановых сплавов в течение 24 часов при 650°C. Не имея в виду ограничиваться какой-либо конкретной теорией, как обсуждено предварительно, полагают, что это может быть приписано различным пределам растворимости никеля в твердом состоянии в TiNi фазе при 675°C по сравнению с 650°C. Другими словами, характеристические температуры превращения аустенита для никель-титановых сплавов, имеющих равновесное количество никеля в твердом растворе в TiNi фазе при 675°C, являются более низкими, чем характеристические температуры превращения аустенита для никель-титановых сплавов, имеющих равновесное количество никеля в твердом растворе в TiNi фазе при 650°C.

Кроме того, как показывает таблица 1, интервал температур превращения аустенита обычно имеет тенденцию к сужению с повышением времени старения при данной температуре старения для обоих сплавов.

Пример 2

Дополнительные образцы двух сплавов, приготовленных согласно вышеприведенному примеру 1, были состарены с использованием следующей двухэтапной процедуры старения. Сплавы были состарены при первой температуре старения примерно 675°C в течение 24 часов и потом состарены при второй температуре старения, как указано ниже, в таблице 2. После каждого периода старения были определены температуры превращения аустенита для каждого сплава с использованием испытания на упругое свободное возвращение формы после деформации, описанного в примере 1.

Таблица 2

Вторая температура старения	Время старения	52 ат.% Ni				55 ат.% Ni			
		A _s	A _f	Интервал температур превращения аустенита		A _s	A _f	Интервал температур превращения аустенита	
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	

Как можно видеть из таблицы 2, путем старения любого из сплавов в течение 24 часов при второй температуре старения 600°C могут быть достигнуты стабильные температуры превращения аустенита (как A_s, так и A_f) (т.е. A_s и A_f каждого из сплавов после 24 часов старения при 600°C не отклоняются более чем на 10°C при термической обработке никель-титанового сплава в тех же самых условиях в течение дополнительных 8 часов). Дополнительно, стабильные температуры превращения, достигнутые после 24 часов старения при второй температуре старения 600°C, являются также независимыми от общего состава никель-титанового сплава. То есть A_s сплава с 55 ат.% Ni находится в пределах 10°C от A_s сплава с 52 ат.% Ni после термической обработки сплавов при второй температуре старения 600°C в течение 24 часов; и A_f сплава с 55 ат.% Ni находится в пределах 10°C от A_f сплава с 52 ат.% Ni после термической обработки сплавов при второй температуре старения 600°C в течение 24 часов.

Для сравнения, это проявляется после старения сплавов в течение 6 часов при второй температуре 600°C, A_f сплава с 52 ат.% Ni, и A_s и A_f сплава с 55 ат.% Ni являются стабильными, причем первоначальные температуры аустенита не являются независимыми от общего состава. Дополнительно, после 2 часов старения при второй температуре старения 600°C ни A_s, ни A_f сплава с 52 ат.% Ni не являются стабильными, и первоначальные температуры аустенита не являются независимыми от общего состава.

Хотя, не в качестве ограничения, полагают, что количество никеля в твердом растворе в TiNi фазе в сплаве с 55 ат.% Ni перед старением при второй температуре старения было более близким к пределу растворимости никеля в твердом состоянии в TiNi фазе при 600°C, чем для сплава с 52 ат.% Ni. Поэтому время старения при 600°C, требуемое для достижения стабильных температур превращения аустенита, для сплава с 55 ат.% Ni было меньше, чем для сплава с 52 ат.% Ni. Однако, как показывает таблица 2, температуры превращения аустенита, которые обе являются стабильными и независимыми от общего состава, могут быть достигнуты путем старения сплавов в течение 24 часов при 600°C. Поэтому та же самая термическая обработка может быть использована для обоих сплавов безотносительно первоначального состояния сплава.

Как можно видеть из таблицы 2, старением любого сплава в течение 72 часов при второй температуре старения 566°C могут быть достигнуты стабильные температуры

превращения (как A_s , так и A_f) (т.е. A_s и A_f каждого из сплавов после 72 часов старения при 566°C не отклоняются более чем на 10°C при термической обработке никель-титанового сплава в тех же самых условиях в течение дополнительных 8 часов).

Дополнительно, стабильные температуры превращения аустенита, достигнутые после 72 часов старения при второй температуре старения 566°C, являются также независимыми от общего состава никель-титанового сплава. То есть A_s сплава с 55 ат.% Ni находится в пределах 10°C от A_s сплава с 52 ат.% Ni после термической обработки сплавов при второй температуре старения 566°C в течение 72 часов; и A_f сплава с 55 ат.% Ni находится в пределах 10°C от A_f сплава с 52 ат.% Ni после термической обработки сплавов при второй температуре старения 566°C в течение 72 часов.

Для сравнения, хотя это проявляется после старения сплавов в течение 24 часов при второй температуре старения 566°C, A_f сплава с 52 ат.% Ni и A_s и A_f сплава с 55 ат.% Ni являются стабильными, причем первоначальные температуры аустенита не являются независимыми от общего состава. Дополнительно, при старении от 2 до 6 часов при второй температуре старения 566°C температуры превращения аустенита не являются ни стабильными, ни независимыми от общего состава.

Дополнительно, как показано в таблице 2, стабильные температуры превращения (A_s и A_f), достигнутые после старения никель-титановых сплавов в течение 24 часов при 600°C, являются более низкими, чем стабильные температуры превращения, достигнутые после старения никель-титановых сплавов в течение 24 часов при 566°C. Не имея в виду ограничиваться какой-либо конкретной теорией, как обсуждено предварительно, полагают, что это может быть приписано различным пределам растворимости никеля в твердом состоянии в TiNi фазе при 600°C по сравнению с 566°C. Другими словами, характеристические температуры превращения аустенита для никель-титановых сплавов, имеющих равновесное количество никеля в твердом растворе в TiNi фазе при 600°C, являются более низкими, чем характеристические температуры превращения аустенита для никель-титановых сплавов, имеющих равновесное количество никеля в твердом растворе в TiNi фазе при 566°C.

Кроме этого, как показано в таблице 2, интервал температур превращения аустенита обычно имеет тенденцию к сужению с увеличением времени старения при данной температуре старения для обоих сплавов. Как обсуждено предварительно, что касается температур превращения аустенита, полагают, что относительно маленькие колебания интервала температур превращения аустенита для сплава с 55 ат.% Ni, состаренного при 600°C, свойственны сплаву, имеющему количество никеля в твердом растворе в TiNi фазе, близкое к пределу растворимости в твердом состоянии перед старением при 600°C.

Следует понимать, что настоящее описание иллюстрирует аспекты изобретения, существенные для четкого понимания изобретения. Определенные аспекты изобретения, которые будут очевидны специалистам в этой области техники и которые, поэтому, не будут способствовать лучшему пониманию изобретения, не представлены для упрощения настоящего описания. Хотя настоящее изобретение было описано в соединении с определенными вариантами осуществления, специалисты в этой области техники после рассмотрения вышеупомянутого описания поймут, что могут быть применены многие модификации и вариации изобретения. Подразумевается, что все такие вариации и модификации изобретения предназначаются для охвата вышеупомянутым описанием и последующей формулой изобретения.

Формула изобретения

1. Способ обработки никель-титанового сплава, содержащего от более 50 вплоть до 55 ат.% никеля, для обеспечения заданной температуры превращения аустенита, включающий выбор заданной температуры превращения аустенита и термическую обработку сплава при температуре, обеспечивающей корректирование количества никеля в твердом растворе в TiNi фазе сплава, содержание которого достаточно для достижения

предела растворимости в твердом состоянии во время термической обработки, с достижением стабильной температуры превращения аустенита, которая, по существу, является равной заданной температуре превращения аустенита.

5 2. Способ по п.1, в котором заданную температуру превращения аустенита выбирают в пределах от -100 до 100°C.

3. Способ по п.1, в котором термическую обработку сплава проводят таким образом, что после нее стабильная температура превращения аустенита не зависит от состава сплава.

10 4. Способ по п.1, в котором термическая обработка сплава включает изотермическое старение.

5. Способ по п.4, в котором изотермическое старение осуществляют при температуре 500°C-800°C.

6. Способ по п.1, в котором термическая обработка сплава включает изотермическое старение в течение по меньшей мере 2 ч.

15 7. Способ по п.1, в котором термическая обработка сплава включает изотермическое старение в течение по меньшей мере 24 ч.

8. Способ по п.1, в котором термическая обработка сплава включает старение сплава при первой температуре старения и затем старение при второй температуре старения, причем первая температура старения выше второй температуры старения.

20 9. Способ по п.8, в котором первую температуру старения выбирают в пределах от 600 до 800°C, а вторую температуру старения выбирают в пределах от 500 до 600°C.

10. Способ по п.8, в котором сплав достигает стабильной температуры превращения аустенита во время старения при второй температуре старения.

25 11. Способ по п.1, в котором термическая обработка сплава включает старение сплава при первой температуре старения и затем при второй температуре старения, причем первая температура старения ниже второй температуры старения.

12. Способ по п.11, в котором первую температуру старения выбирают в пределах от 500 до 600°C, а вторую температуру старения выбирают в пределах от 600 до 800°C.

30 13. Способ по п.11, в котором сплав достигает стабильной температуры превращения аустенита во время старения при второй температуре старения.

14. Способ по п.1, в котором обрабатывают бинарный никель-титановый сплав.

15. Способ по п.1, в котором обрабатывают сплав, дополнительно содержащий по меньшей мере один дополнительный легирующий элемент.

35 16. Способ по п.15, в котором дополнительный легирующий элемент выбирают из группы, состоящей из меди, железа и гафния.

40 17. Способ обработки по меньшей мере двух никель-титановых сплавов с различными составами, содержащих от более 50 вплоть до 55 ат. % никеля, для достижения заданной температуры превращения аустенита, включающий выбор заданной температуры превращения аустенита и подвергание никель-титановых сплавов аналогичной термической обработке с достижением стабильных температур превращения аустенита, причем стабильные температуры превращения аустенита, по существу, равны заданной температуре превращения аустенита.

45 18. Способ по п.17, в котором по меньшей мере два сплава содержат достаточное количество никеля для достижения предела растворимости в твердом состоянии во время термической обработки.

19. Способ по п.17, в котором термическая обработка по меньшей мере двух сплавов включает изотермическое старение.

50 20. Способ по п.17, в котором термическая обработка по меньшей мере двух сплавов включает старение сплавов при первой температуре старения и затем старение при второй температуре старения, причем первая температура старения выше второй температуры старения.

21. Способ по п.20, в котором по меньшей мере два сплава достигают стабильной температуры превращения аустенита во время старения при второй температуре старения.

22. Способ по п.17, в котором термическая обработка по меньшей мере двух сплавов включает старение сплавов при первой температуре старения и затем старение при второй температуре старения, причем первая температура старения ниже второй температуры старения.

5 23. Способ по п.22, в котором по меньшей мере два сплава достигают стабильной температуры превращения аустенита во время старения при второй температуре старения.

24. Способ обработки никель-титанового сплава, имеющего области переменного состава и содержащего от более 50 вплоть до 55 ат.% никеля, для обеспечения заданной температуры превращения аустенита в каждой области, включающий термическую
10 обработку сплава при температуре, обеспечивающей корректирование количества никеля в твердом растворе в TiNi фазе сплава в каждой области никель-титанового сплава, с достижением каждой из областей сплава стабильной температуры превращения аустенита, которая, по существу, является равной заданной температуре превращения аустенита.

25. Способ по п.24, в котором термическая обработка сплава включает изотермическое
15 старение.

26. Способ по п.24, в котором термическая обработка сплава включает старение сплава при первой температуре старения и затем старение при второй температуре старения, причем первая температура старения выше второй температуры старения.

27. Способ по п.26, в котором сплав достигает стабильной температуры превращения
20 аустенита во время старения при второй температуре старения.

28. Способ по п.24, в котором термическая обработка сплава включает старение сплава при первой температуре старения и затем старение при второй температуре старения, причем первая температура старения ниже второй температуры старения.

29. Способ по п.28, в котором сплав достигает стабильной температуры превращения
25 аустенита во время старения при второй температуре старения.

30. Способ обработки никель-титанового сплава, содержащего от более 50 вплоть до 55 ат.% никеля, для достижения заданного интервала температур превращения аустенита, включающий изотермическое старение никель-титанового сплава в печи при температуре от 500 до 800°C в течение по меньшей мере 2 ч, с достижением интервала температур
30 превращения аустенита не более 15°C, которая, по существу, является равной заданному интервалу температур превращения аустенита.

31. Способ по п.30, в котором достигают интервал температур превращения аустенита не более 10°C.

32. Способ по п.30, в котором достигают интервал температур превращения аустенита
35 не более 6°C.

33. Способ по п.30, в котором обрабатывают бинарный никель-титановый сплав.

34. Способ по п.30, в котором обрабатывают сплав, дополнительно содержащий по меньшей мере один дополнительный легирующий элемент.

35. Способ по п.34, в котором дополнительный легирующий элемент выбирают из
40 группы, состоящей из меди, железа и гафния.

36. Способ обработки никель-титанового сплава, имеющего области переменного состава и содержащего от более 50 вплоть до 55 ат.% никеля для достижения заданного интервала температур превращения аустенита в каждой области, включающий
45 изотермическое старение сплава при температуре, обеспечивающей корректирование количества никеля в твердом растворе в TiNi фазе сплава в каждой области никель-титанового сплава, с достижением каждой из областей интервала температур превращения аустенита не более 15°C, который, по существу, является равным заданному интервалу температур превращения аустенита.

37. Способ по п.36, в котором достигают интервал температур превращения аустенита
50 не более 10°C.

38. Способ по п.36, в котором достигают интервал температур превращения аустенита не более 6°C.

39. Способ обработки никель-титанового сплава, содержащего от более 50 вплоть до 55

ат.% никеля, для обеспечения заданной температуры превращения аустенита, включающий старение сплава в печи при первой температуре старения для достижения стабильной температуры превращения аустенита, и старение сплава при второй температуре старения, отличающейся от первой температуры старения, с обеспечением
 5 интервала температур превращения аустенита, по существу, равного заданному интервалу температур превращения.

40. Способ по п.39, в котором вторую температуру старения сплава выбирают ниже первой температуры старения.

41. Способ по п.39, в котором вторую температуру старения сплава выбирают выше
 10 первой температуры старения.

42. Способ по п.39, в котором старение сплава при второй температуре проводят с достижением интервала температур превращения аустенита больше интервала температур превращения аустенита, достигнутого при старении сплава при первой температуре старения.

15

20

25

30

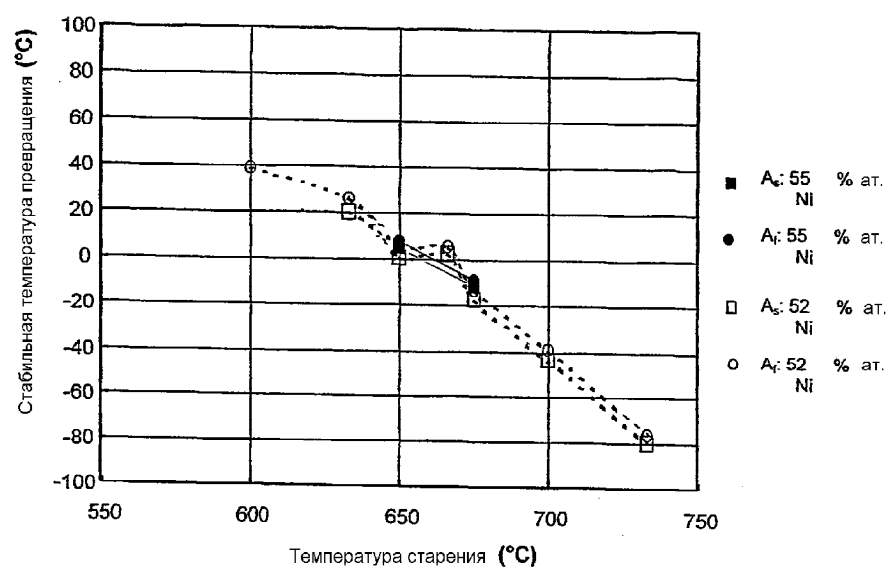
35

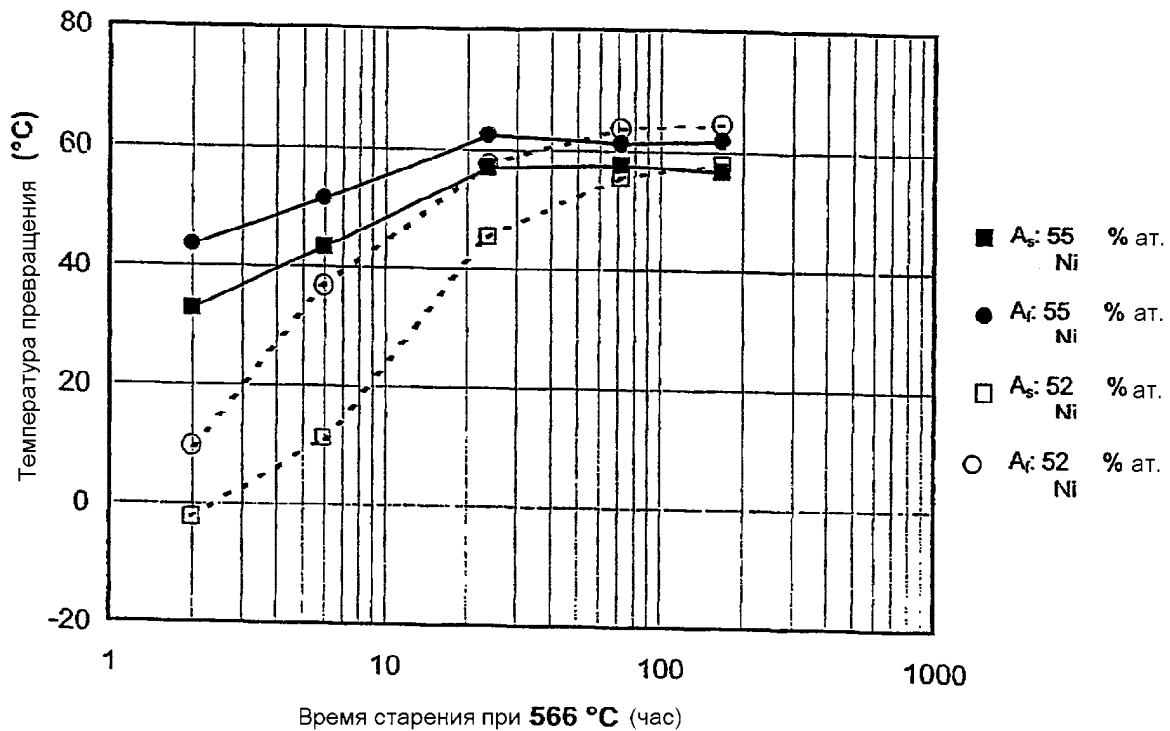
40

45

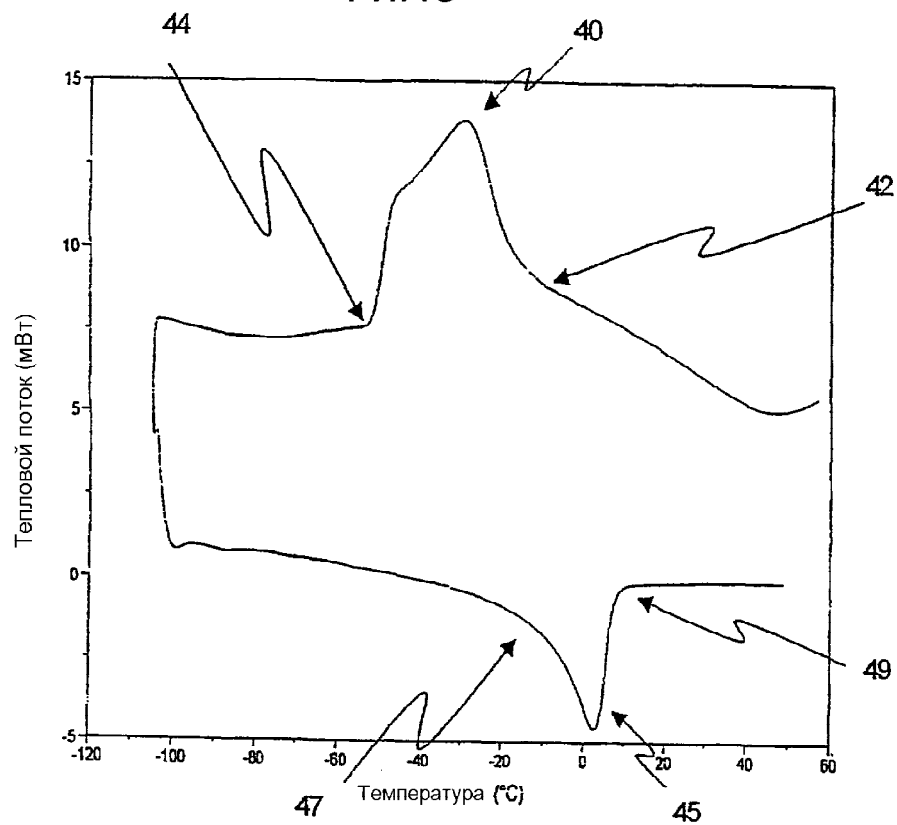
50

Фиг.2

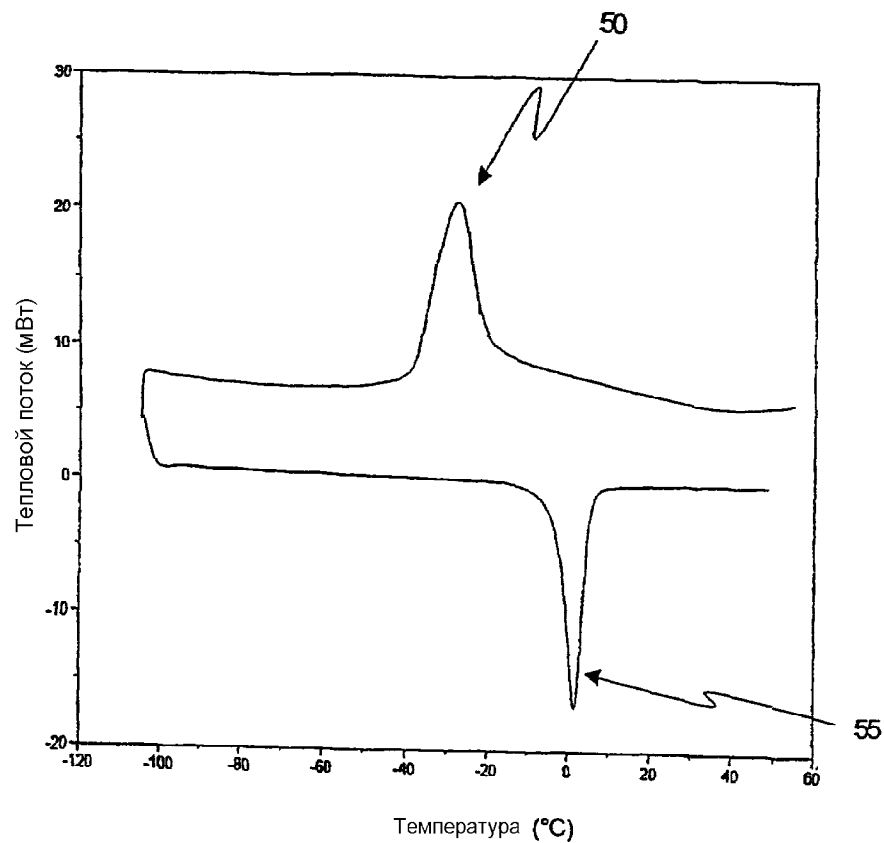




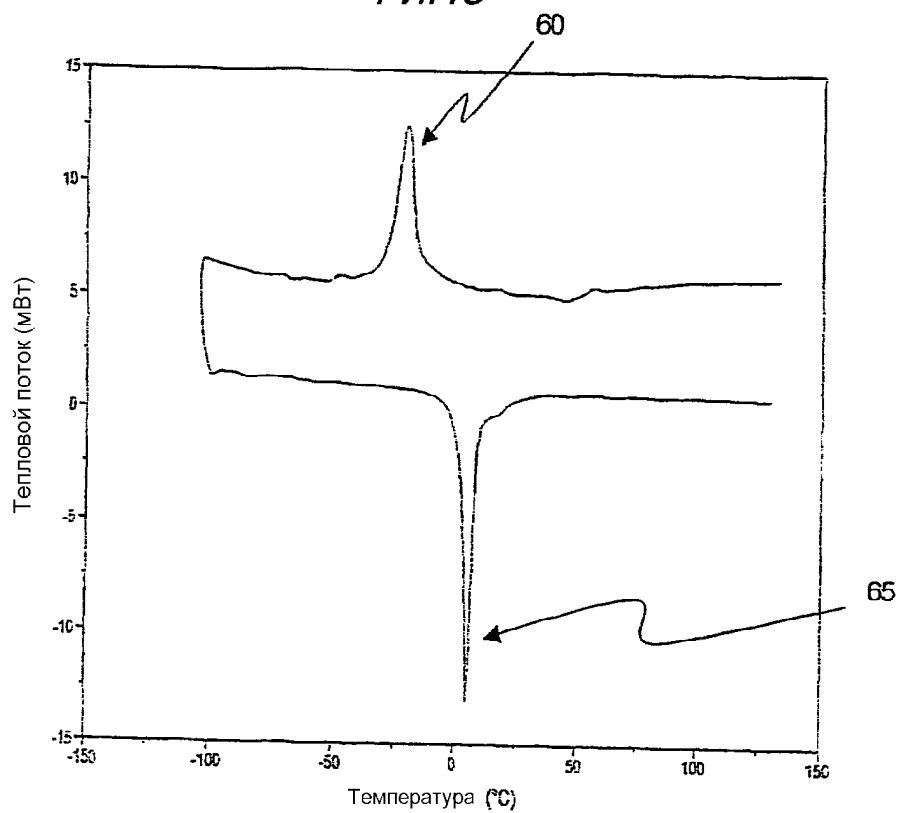
Фиг.3



Фиг.4



Фиг.5



Фиг.6