

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



(19) RU⁽¹¹⁾ 2 566 113⁽¹³⁾ C2

(51) МПК
C22C 14/00 (2006.01)
C22F 1/18 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2012136150/02, 29.12.2010

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
29.12.2010

Приоритет(ы):

(30) Конвенционный приоритет:
22.01.2010 US 12/691,952

(43) Дата публикации заявки: 10.03.2014 Бюл. № 7

(45) Опубликовано: 20.10.2015 Бюл. № 29

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: RU 2283889 C1, 20.09.2006. RU 2169782 C1, 27.06.2001. RU 2169204 C1, 20.06.2001. RU 2172359 C1, 20.08.2001. US 2005/0257864 A1,24.11.2005

(85) Дата начала рассмотрения заявки РСТ на национальной фазе: 22.08.2012

(86) Заявка РСТ:
US 2010/062284 (29.12.2010)

(87) Публикация заявки РСТ:
WO 2011/090733 (28.07.2011)

Адрес для переписки:
129090, Москва, ул. Б.Спасская, 25, стр.3, ООО
"Юридическая фирма Городисский и
Партнеры", пат.пов. Ю.Д.Кузнецову, рег.№ 595

(72) Автор(ы):
БРАЙАН, Дэвид Дж. (US)

(73) Патентообладатель(и):
ЭйтИАй ПРОПЕРТИЗ, ИНК. (US)

R
U
2
5
6
6
1
1
3
C
2
3
1
1
6
6
2
5
U
R

(54) ПОЛУЧЕНИЕ ВЫСОКОПРОЧНОГО ТИТАНА

(57) Реферат:

Изобретение относится к способу получения титановых сплавов. Способ термомеханической обработки титанового сплава включает обработку титанового сплава давлением, включающую пластическое деформирование при температуре в области альфа-бета фаз до эквивалентной пластической деформации с по меньшей мере 25%-ным уменьшением площади поперечного сечения, после чего температура

титанового сплава не достигает и не превышает температуры бета-перехода титанового сплава. Далее проводят одноступенчатую термообработку при температуре, меньшей или равной температуре бета-перехода минус 11,1°C. Полученные сплавы обладают высокими характеристиками прочности и ударной вязкости. 3 н. и 38 з.п. ф-лы, 7 ил., 3 табл., 4 пр.

RUSSIAN FEDERATION



(19) RU⁽¹¹⁾ 2 566 113⁽¹³⁾ C2

(51) Int. Cl.
C22C 14/00 (2006.01)
C22F 1/18 (2006.01)

FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) ABSTRACT OF INVENTION

(21)(22) Application: 2012136150/02, 29.12.2010

(24) Effective date for property rights:
29.12.2010

Priority:

(30) Convention priority:
22.01.2010 US 12/691,952

(43) Application published: 10.03.2014 Bull. № 7

(45) Date of publication: 20.10.2015 Bull. № 29

(85) Commencement of national phase: 22.08.2012

(86) PCT application:
US 2010/062284 (29.12.2010)

(87) PCT publication:
WO 2011/090733 (28.07.2011)

Mail address:

129090, Moskva, ul. B.Spasskaja, 25, str.3, OOO
"Juridicheskaja firma Gorodisskij i Partnery",
pat.pov. Ju.D.Kuznetsov, reg.N 595

(72) Inventor(s):
BRAJAN, Dehvid Dzh. (US)

(73) Proprietor(s):
EhjTiAj PROPERTIZ, INK. (US)

C2
3
1
1
6
6
1
1
2
R
U

R
U
2
5
6
6
1
1
3
C
2

(54) ALLOYING OF HIGH-STRENGTH TITAN

(57) Abstract:

FIELD: metallurgy.

SUBSTANCE: invention relates to the method of alloying of titanium alloys. The method of thermomechanical treatment of titanium alloy includes the pressure treatment of titanium alloy which comprises plastic deformation at the temperature in the field of alpha and beta phases until equivalent plastic deformation with at least 25% decrease of the cross

section area then the temperature of the titanium alloy doesn't achieve and doesn't exceed the temperature of beta transition of the titanium alloy. Further one-stage heat treatment is performed at the temperature, smaller or equal to the beta transition temperature minus 11.1°C.

EFFECT: alloys have high characteristics of strength and impact viscosity.

41 cl, 7 dwg, 3 tbl, 4 ex

ОБЛАСТЬ ТЕХНИКИ

[0001] Настоящее изобретение относится к способам получения титановых сплавов, обладающих высокой прочностью и высокой вязкостью разрушения. В способах по настоящему изобретению не требуются многостадийные термообработки, используемые в некоторых существующих способах производства титановых сплавов.

ОПИСАНИЕ СУЩЕСТВУЮЩЕГО УРОВНЯ ТЕХНИКИ

[0002] Титановые сплавы, как правило, обладают высоким соотношением прочности и веса, сопротивлением ползучести при умеренно высоких температурах и устойчивы к коррозии. Поэтому титановые сплавы используются в аэрокосмической и авиационной промышленности, включая, например, важные конструкционные детали, такие как элементы шасси и рамы двигателей. Титановые сплавы используются также в реактивных двигателях для таких деталей, как роторы, лопатки компрессоров, детали гидравлической системы и кабины.

[0003] Чистый титан испытывает аллотропное фазовое превращение при температуре примерно 882°C. Ниже этой температуры титан принимает гексагональную плотноупакованную кристаллическую структуру, называемую α-фазой. Выше этой температуры титан имеет объемно-центрированную кубическую решетку, называемую β-фазой. Температура, при которой происходит превращение α-фазы в β-фазу, называется температурой бета-перехода (T_β). На температуру бета-перехода влияют элементы внедрения и замещения и поэтому она зависит от примесных и, что еще более важно, от легирующих элементов.

[0004] В титановых сплавах легирующие элементы подразделяются на элементы, стабилизирующие α-фазу, или элементы, стабилизирующие β-фазу. Легирование титана элементами, стабилизирующими α-фазу («α-стабилизаторами»), увеличивает температуру бета-перехода. Алюминий, например, является элементом замещения для титана и α-стабилизатором. Легирующие элементы внедрения для титана, которые являются α-стабилизаторами, включают, например, кислород, азот и углерод.

[0005] Легирование титана элементами, стабилизирующими β-фазу, понижает температуру бета-перехода. Элементами, стабилизирующими β-фазу, могут быть β-изоморфные элементы или β-эвтектоидные элементы, в зависимости от результирующих диаграмм состояния. Примерами β-изоморфных легирующих элементов для титана являются ванадий, молибден и ниобий. Путем легирования при достаточной концентрации этими β-изоморфными легирующими элементами можно понизить температуру бета-перехода до комнатной температуры или ниже нее. Примерами β-эвтектоидных легирующих элементов являются хром и железо. Кроме того, другие элементы, такие как, например, кремний, цирконий и гафний, являются нейтральными в том смысле, что эти элементы оказывают небольшое влияние на температуру бета-перехода титана или титановых сплавов.

[0006] На ФИГ. 1А представлена схематичная диаграмма состояния, показывающая влияние добавки к титану α-стабилизатора. По мере увеличения содержания α-стабилизатора температура бета-перехода также возрастает, что видно по положительному наклону линии 10 температуры бета-перехода. Область 12 бета-фазы лежит выше линии 10 температуры бета-перехода и является областью диаграммы состояния, где в титановом сплаве присутствует только β-фаза. На ФИГ. 1А ниже линии 10 температуры бета-перехода лежит область 14 альфа-бета-фаз, которая представляет собой область на диаграмме состояния, где в титановом сплаве присутствуют α-фаза и β-фаза (α+β). Ниже области 14 альфа-бета-фаз находится область 16 альфа-фазы, где в титановом сплаве присутствует только α-фаза.

[0007] На ФИГ. 1В представлена схематичная диаграмма состояния, показывающая влияние добавки к титану изоморфного β -стабилизатора. При повышенном содержании β -стабилизатора понижается температура бета-перехода, на что указывает отрицательный наклон кривой линии 10 температуры бета-перехода. Выше линии 10 5 температуры бета-перехода находится область 12 бета-фазы. Область 14 альфа-бета-фаз и область 16 альфа-фазы также присутствуют на схематичной диаграмме состояния титана с изоморфным β -стабилизатором по ФИГ. 1В.

[0008] На ФИГ. 1С представлена схематичная диаграмма состояния, показывающая влияние добавки к титану эвтектоидного β -стабилизатора. На фазовой диаграмме 10 показана область 12 бета-фазы, линия 10 температуры бета-перехода, область 14 альфа-бета-фаз и область 16 альфа-фазы. Кроме того, на диаграмме состояния, показанной на ФИГ. 1С, существуют две дополнительные двухфазные области, которые содержат либо α -фазу, либо β -фазу вместе с продуктом реакции титана и эвтектоидной β -стабилизирующей легирующей добавки (Z).

15 [0009] Титановые сплавы, как правило, классифицируют по их химическому составу и их микроструктуре при комнатной температуре. Технически чистый (ТЧ) титан и титановые сплавы, которые содержат только α -стабилизаторы, такие как алюминий, относят к альфа-сплавам. Это преимущественно однофазные сплавы, состоящие, по существу, из α -фазы. Однако, ТЧ титан и другие альфа-сплавы после отжига ниже 20 температуры бета-перехода главным образом содержат примерно 2-5 объемных процентов β -фазы, которая обычно стабилизована примесями железа в титановом альфа-сплаве. Небольшой объем β -фазы в сплаве является полезным для контроля размера зерен рекристаллизованной α -фазы.

[0010] Псевдо-альфа-титановые сплавы имеют небольшое количество β -фазы, обычно 25 менее 10 объемных процентов, что приводит к увеличению предела прочности при комнатной температуре и увеличению сопротивления ползучести при температурах использования выше 400°C по сравнению с альфа-сплавами. Примерный псевдо-альфа-титановый сплав может содержать примерно 1 весового процента молибдена.

[0011] Альфа/бета ($\alpha+\beta$) титановые сплавы, такие как сплав Ti-6Al-4V (Ti 6-4) и сплав 30 Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo (Ti 6-2-4-2), содержат обе фазы, альфа и бета и широко используются в аэрокосмической и авиационной промышленности. Микроструктура и свойства альфа/бета-сплавов могут изменяться посредством термообработок и термомеханической обработки.

[0012] Стабильные бета-титановые сплавы, метастабильные бета-титановые сплавы 35 и псевдо-бета-титановые сплавы, вместе классифицируемые как «бета-сплавы», содержат значительно больше β -стабилизирующих элементов, чем альфа/бета-сплавы. Псевдо-бета-титановые сплавы, такие как сплав Ti-10V-2Fe-3Al, содержат достаточные количества β -стабилизирующих элементов, чтобы сохранить полностью β -фазную структуру при закалке в воде, но не при закалке на воздухе. Метастабильные бета-40 титановые сплавы, такие как, например, сплав Ti-15Mo, содержат более высокие уровни β -стабилизаторов и сохраняют полностью β -фазную структуру при охлаждении на воздухе, но могут быть состарены с выделением α -фазы для упрочнения. Стабильные бета-титановые сплавы, такие как, например, сплав Ti-30Mo, сохраняют полностью β -фазную микроструктуру при охлаждении, но не могут быть состарены с выделением 45 α -фазы.

[0013] Известно, что альфа/бета-сплавы чувствительны к скоростям охлаждения при охлаждении от температур выше температуры бета-перехода. Выделение α -фазы по границам зерен в процессе охлаждения уменьшает вязкость разрушения этих сплавов.

В настоящее время при производстве титановых сплавов, обладающих высокой прочностью и высокой вязкостью разрушения, требуется использование сочетания высокотемпературных деформаций с последующей сложной многостадийной термообработкой, которая включает тщательно контролируемые скорости нагревания и непосредственное старение. Например, в публикации заявки на патент США №2004/0250932 A1 раскрыты формование титанового сплава, содержащего по меньшей мере 5% молибдена, до подходящей формы при первой температуре выше температуры бета-перехода или термообработка титанового сплава при первой температуре выше температуры бета-перехода с последующим контролируемым охлаждением со скоростью, не превышающей 5°F (2,8°C) в минуту, до второй температуры ниже температуры бета-перехода. Титановый сплав также может подвергаться термообработке при третьей температуре.

[0014] Схематичный график зависимости температуры от времени, типичный для известного из уровня техники способа получения высокопрочных титановых сплавов с высокой вязкостью разрушения, приведен на ФИГ. 2. Способ, как правило, включает этап деформации при повышенной температуре, проводимой ниже температуры бета-перехода, и этап термообработки, включающей нагрев выше температуры бета-перехода с последующим контролируемым охлаждением. Этапы термомеханической обработки уровня техники, используемые для получения титановых сплавов, обладающих высокой прочностью и высокой вязкостью разрушения, дорогостоящие, и в настоящее время лишь ограниченное число производителей в состоянии проводить эти этапы. Соответственно, было бы предпочтительным создать улучшенный процесс для увеличения прочности и/или вязкости разрушения титановых сплавов.

СУЩНОСТЬ ИЗОБРЕТЕНИЯ

[0015] В соответствии с одним из аспектов настоящего изобретения неограничительный вариант воплощения способа увеличения прочности и вязкости разрушения титанового сплава включает пластическое деформирование титанового сплава при температуре в области альфа-бета-фаз титанового сплава до эквивалентной пластической деформации с по меньшей мере 25%-ым уменьшением площади. После пластического деформирования титанового сплава при температуре в области альфа-бета-фаз титановый сплав не нагревают до температуры на уровне или выше температуры бета-перехода титанового сплава. Затем, в соответствии с неограничительным вариантом воплощения, после пластического деформирования титанового сплава, этот титановый сплав подвергают термообработке при температуре термообработки, меньшей или равной температуре бета-перехода минус 20°F (11,1°C), в течение времени термообработки, достаточного для получения термообработанного сплава, имеющего трещиностойкость (K_{Ic}), которая связана с пределом текучести (ПТ) согласно уравнению $K_{Ic} \geq 173-(0,9)\text{ПТ}$. В другом неограничительном варианте воплощения титановый сплав может подвергаться термообработке после пластической деформации при температуре в области альфа-бета-фаз до эквивалентной пластической деформации с по меньшей мере 25%-ым уменьшением площади при температуре термообработки, меньшей или равной температуре бета-перехода минус 20°F (11,1°C), в течение времени термообработки, достаточного для получения термообработанного сплава, имеющего трещиностойкость (K_{Ic}), которая связана с пределом текучести (ПТ) согласно уравнению $K_{Ic} \geq 217,6-(0,9)\text{ПТ}$.

[0016] Согласно другому аспекту настоящего изобретения неограничительный способ термомеханической обработки титанового сплава включает в себя обработку

титанового сплава давлением в температурном диапазоне обработки давлением от 200°F (111°C) выше температуры бета-перехода титанового сплава до 400°F (222°C) ниже температуры бета-перехода. В неограничительном варианте воплощения, при завершении этапа обработки давлением может происходить эквивалентная пластическая деформация с по меньшей мере 25%-ым уменьшением площади в области альфа-бета-фаз титанового сплава, и титановый сплав не нагревают выше температуры бета-перехода после эквивалентной пластической деформации в области альфа-бета-фаз титанового сплава с по меньшей мере 25%-ым уменьшением площади. В соответствии с одним неограничительным вариантом воплощения, после обработки титанового сплава давлением, этот сплав может подвергаться термообработке в температурном диапазоне термообработки между 1500°F (816°C) и 900°F (482°C) в течение времени термообработки от 0,5 до 24 часов. Титановый сплав может подвергаться термообработке в температурном диапазоне термообработки между 1500°F (816°C) и 900°F (482°C) в течение времени термообработки, достаточного для получения термообработанного сплава, имеющего трещиностойкость (K_{Ic}), которая связана с пределом текучести (ПТ) термообработанного сплава согласно уравнению $K_{Ic} \geq 173 \cdot (0,9) \text{ПТ}$ или в другом неограничительном варианте воплощения, согласно уравнению $K_{Ic} \geq 217,6 \cdot (0,9) \text{ПТ}$.

[0017] В соответствии с еще одним аспектом настоящего изобретения неограничительный вариант воплощения способа обработки титанового сплава включает в себя обработку титанового сплава давлением в области альфа-бета-фаз титанового сплава для обеспечения эквивалентной пластической деформации с по меньшей мере 25%-ым уменьшением площади титанового сплава. В одном неограничительном варианте воплощения способа титановый сплав способен сохранять бета-фазу при комнатной температуре. В неограничительном варианте воплощения, после обработки титанового сплава давлением титановый сплав может подвергаться термообработке при температуре термообработки, не большей температуры бета-перехода минус 20°F (11,1°C), в течение времени термообработки, достаточного для обеспечения титанового сплава со средним пределом прочности на растяжение по меньшей мере 150 ksi (т.е. килофунты на квадратный дюйм) ($1 \text{ ksi} = 6,894757 \text{ МПа}$) и трещиностойкостью K_{Ic} по меньшей мере $70 \text{ ksi} \cdot \text{дюйм}^{1/2}$ ($1 \text{ ksi} \cdot \text{дюйм}^{1/2} = 1,098845 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$). В неограничительном варианте воплощения время термообработки лежит в диапазоне от 0,5 часа до 24 часов.

[0018] Еще один аспект настоящего изобретения касается титанового сплава, который был обработан в соответствии со способом, раскрытым в настоящем изобретении. Один неограничительный вариант воплощения касается сплава Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr, который был обработан способом в соответствии с настоящим изобретением, включающим этапы пластического деформирования и термообработки титанового сплава, причем термообработанный сплав имеет трещиностойкость (K_{Ic}), которая связана с пределом текучести (ПТ) термообработанного сплава согласно уравнению $K_{Ic} \geq 217,6 \cdot (0,9) \text{ПТ}$. Как известно в уровне техники, сплав Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr, называемый также сплавом Ti-5553 или сплавом Ti 5-5-5-3, содержит номинально 5 весовых процентов алюминия, 5 весовых процентов ванадия, 5 весовых процентов молибдена, 3 весовых процента хрома, а остальное - титан и неизбежные примеси. В одном неограничительном варианте воплощения титановый сплав подвергается пластическому деформированию при температуре в области альфа-бета-фаз титанового сплава до

эквивалентной пластической деформации с по меньшей мере 25%-ым уменьшением площади. После пластического деформирования титанового сплава при температуре в области альфа-бета-фаз титановый сплав не нагревают до температуры на уровне или выше температуры бета-перехода титанового сплава. Кроме того, в соответствии с неограничительным вариантом воплощения, титановый сплав подвергают термообработке при температуре термообработки, меньшей или равной температуре бета-перехода минус 20°F (11,1°C), в течение времени термообработки, достаточного для получения термообработанного сплава, имеющего трещиностойкость (K_{Ic}), которая связана с пределом текучести (ПТ) согласно уравнению $K_{Ic} \geq 217,6-(0,9)PT$.

[0019] Еще один аспект в соответствии с настоящим изобретением направлен на изделие, подходящее для использования в по меньшей мере одной из отраслей авиационной и аэрокосмической промышленности и содержащее сплав Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr, который был обработан способом, включающим пластическое деформирование и термообработку титанового сплава по режиму, достаточному для того, чтобы трещиностойкость (K_{Ic}) термообработанного сплава была связана с пределом текучести (ПТ) термообработанного сплава согласно уравнению $K_{Ic} \geq 217,6-(0,9)PT$. В неограничительном варианте воплощения титановый сплав может подвергаться пластическому деформированию при температуре в области альфа-бета-фаз титанового сплава до эквивалентной пластической деформации с по меньшей мере 25%-ым уменьшением площади. После пластического деформирования титанового сплава при температуре в области альфа-бета-фаз титановый сплав не нагревают до температуры на уровне или выше температуры бета-перехода титанового сплава. В неограничительном варианте воплощения титановый сплав может подвергаться термообработке при температуре термообработки, меньшей или равной (т.е. не большей) температуре бета-перехода минус 20°F (11,1°C), в течение времени термообработки, достаточного для получения термообработанного сплава, имеющего трещиностойкость (K_{Ic}), которая связана с пределом текучести (ПТ) термообработанного сплава согласно уравнению $K_{Ic} \geq 217,6-(0,9)PT$.

30 КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ЧЕРТЕЖЕЙ

[0020] Признаки и преимущества описанных здесь способов можно лучше понять при обращении к прилагаемым чертежам, на которых:

[0021] ФИГ. 1А - пример диаграммы состояния для титана, легированного элементом, стабилизирующим альфа-фазу;

[0022] ФИГ. 1В - пример диаграммы состояния для титана, легированного изоморфным элементом, стабилизирующим бета-фазу;

[0023] ФИГ. 1С - пример диаграммы состояния для титана, легированного эвтектоидным элементом, стабилизирующим бета-фазу;

[0024] ФИГ. 2 - схематическое представление термомеханической обработки уровня техники для получения высокопрочных титановых сплавов с высокой вязкостью разрушения;

[0025] ФИГ. 3 - диаграмма время-температура неограничительного варианта воплощения способа по настоящему изобретению, включающего практически полностью альфа-бета-фазную пластическую деформацию;

[0026] ФИГ. 4 - диаграмма время-температура другого неограничительного варианта воплощения способа по настоящему изобретению, включающего пластическую деформацию «через бета-переход»;

[0027] ФИГ. 5 - график зависимости трещиностойкости K_{Ic} от предела текучести для

различных титановых сплавов, термообработанных согласно техпроцессам уровня техники;

⁵ [0028] ФИГ. 6 - график зависимости трещиностойкости K_{Ic} от предела текучести для титановых сплавов, подвергнутых пластической деформации и термообработке согласно неограничительным вариантам воплощения способа по настоящему изобретению, и сравнение этих вариантов воплощения со сплавами, термообработанными согласно техпроцессам уровня техники;

[0029] ФИГ. 7А - микрофотография сплава Ti 5-5-5-3 в продольном направлении после прокатки и термообработки при 1250°F (677°C) в течение 4 часов; и

¹⁰ [0030] ФИГ. 7В - микрофотография сплава Ti 5-5-5-3 в поперечном направлении после прокатки и термообработки при 1250°F (677°C) в течение 4 часов.

[0031] Читатель по достоинству оценит вышеизложенные, а также другие подробности при рассмотрении нижеследующего подробного описания некоторых неограничительных вариантов воплощения способов по настоящему изобретению.

¹⁵ ПОДРОБНОЕ ОПИСАНИЕ НЕКОТОРЫХ НЕОГРАНИЧИТЕЛЬНЫХ ВАРИАНТОВ ВОПЛОЩЕНИЯ

[0032] В настоящем описании неограничительных вариантов воплощения, кроме рабочих примеров или если не указано иное, все числа, выражающие количества или характеристики, следует понимать как модифицированные во всех случаях термином «примерно». Итак, если не указано обратное, любые числовые параметры, изложенные в следующем описании, являются приблизительными значениями, которые могут изменяться в зависимости от тех желательных свойств, которые пытаются получить в способах получения высокопрочных титановых сплавов с высокой вязкостью разрушения в соответствии с настоящим изобретением. По крайней мере, а не как попытка ограничить применение доктрины эквивалентов к объему формулы изобретения, каждый числовой параметр должен по меньшей мере толковаться в свете количества сообщенных значащих цифр, применяя обычные методы округления.

[0033] Любой патент, публикация или другой раскрывающий материал, который указан включенным, в целом или частично, посредством ссылки в настоящий документ, включен в него только в той степени, в которой включенный материал не противоречит существующим определениям, заявлениям или другому раскрытыму материалу, изложенному в настоящем изобретении. Таким образом, по мере необходимости, раскрытие, изложенное в настоящем документе, заменяет собой любые противоречащие материалы, включенные в настоящий документ по ссылке. Любой материал или его часть, указанные включенными посредством ссылки в настоящий документ, но противоречащие существующим определениям, заявлениям или другим раскрытым материалам, изложенным в настоящем документе, включен только в той мере, в какой не возникают противоречия между включенным материалом и существующим в раскрытии материалом.

[0034] Некоторые неограничительные варианты воплощения согласно настоящему изобретению направлены на способы термомеханической обработки для получения высокопрочных титановых сплавов с высокой вязкостью разрушения, которые не нуждаются в использовании сложных, многостадийных термообработок. Удивительно, но в отличие от сложных способов термомеханической обработки, используемых в настоящее время и исторически для титановых сплавов, некоторые неограничительные варианты воплощения раскрытых здесь способов термомеханической обработки включают только этап высокотемпературной деформации с последующей одностадийной термообработкой для придания титановым сплавам сочетаний прочности

на растяжение, пластичности и вязкости разрушения (трещиностойкости), требуемых в определенных аэрокосмических и авиационных материалах. Ожидается, что варианты воплощения термомеханической обработки в рамках настоящего изобретения могут выполнятся на любом предприятии, достаточно хорошо оснащенном для

5 осуществления термомеханической и термической обработки титана. Эти варианты воплощения отличаются от традиционных приемов термообработки для придания титановым сплавам высокой прочности и высокой вязкости разрушения, обычно требующих сложного оборудования для тщательно контролирования скоростей охлаждения сплава.

10 [0035] Ссылаясь на схематичный график зависимости температуры от времени на ФИГ. 3, один неограничительный способ 20 по настоящему изобретению увеличения прочности и вязкости разрушения титанового сплава включает в себя пластическое деформирование 22 титанового сплава при температуре в области альфа-бета-фаз титанового сплава до эквивалентной пластической деформации с по меньшей мере

15 25%-ым уменьшением площади. (См. ФИГ. 1А-1С и приведенные выше рассуждения относительно области альфа-бета-фаз титанового сплава). Эквивалентная 25%-ая пластическая деформация в области альфа-бета-фаз задействует конечную температуру 24 пластической деформации в области альфа-бета-фаз. Термин «конечная температура пластической деформации» определен в настоящем документе как температура

20 титанового сплава при окончании пластического деформирования титанового сплава и перед его старением. Как показано далее на ФИГ. 3, в ходе способа 20 после пластической деформации 22 титановый сплав не нагревают выше температуры бета-перехода (T_β) титанового сплава. В некоторых неограничительных вариантах

25 воплощения и как показано на ФИГ. 3, после пластической деформации при конечной температуре 24 пластической деформации титановый сплав подвергают термообработке 26 при температуре ниже температуры бета-перехода в течение времени, достаточного для придания титановому сплаву высокой прочности и высокой вязкости разрушения. В неограничительном варианте воплощения термообработка 26 может выполняться

30 при температуре по меньшей мере на 20°F (11,1°C) ниже температуры бета-перехода. В некоторых неограничительных вариантах воплощения температура термообработки 26 может быть ниже конечной температуры 24 пластической деформации. В других неограничительных вариантах воплощения, не показанных на

35 ФИГ. 3, с целью дополнительного увеличения вязкости разрушения титанового сплава температура термообработки может быть выше конечной температуры пластической деформации, но меньше температуры бета-перехода. Должно быть понятно, что хотя на ФИГ. 3 показана постоянная температура для пластической деформации 22 и термообработки 26, в других неограничительных вариантах воплощения способа по

40 настоящему изобретению температура пластической деформации 22 и/или термообработки 26 может изменяться. Например, естественное уменьшение температуры заготовки из титанового сплава, возникающее в процессе пластической деформации, находится в рамках объема раскрытых в настоящем документе вариантов воплощения. Схематичный график температура-время на ФИГ. 3 иллюстрирует, что некоторые

45 варианты воплощения раскрытых здесь способов термообработки титановых сплавов для придания им высокой прочности и высокой вязкости разрушения отличаются от традиционных приемов термообработки для придания титановым сплавам высокой прочности и высокой вязкости разрушения. Например, традиционные приемы

термообработки, как правило, требуют многостадийных термообработок и сложного оборудования для тщательного контролирования скоростей охлаждения сплава и поэтому дорогостоящи и не могут осуществляться на всем оборудовании для термообработки. Вместе с тем, варианты воплощения обработки, иллюстрируемые на 5 ФИГ. 3, не задействуют многостадийную термообработку и могут выполняться с применением традиционного оборудования для термообработки.

[0036] В общем, конкретный состав титановых сплавов определяет сочетание времен (и) термообработки и температур(ы) термообработки, которые приадут желаемые 10 механические свойства при использовании способов по настоящему изобретению.

10 Кроме того, времена и температуры термообработки могут регулироваться для получения конкретного желаемого баланса прочности и вязкости разрушения для конкретного состава сплава. В некоторых раскрытиях здесь неограничительных 15 вариантах воплощения, например, при регулировании времен и температур термообработки, используемых для обработки сплава Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr (Ti 5.5-5-3) способом в соответствии с настоящим изобретением, были достигнуты пределы 20 прочности на растяжение от 140 ksi до 180 ksi в сочетании с уровнями трещиностойкости K_{Ic} от $60 \text{ ksi} \cdot \text{дюйм}^{1/2}$ до $100 \text{ ksi} \cdot \text{дюйм}^{1/2}$. Рассматривая настоящее изобретение, специалист без труда может определить конкретное(ые) сочетание(я) времени и температуры термообработки, которые будут придавать оптимальные свойства прочности и вязкости 25 разрушения конкретному титановому сплаву для предусмотренного ему применения.

[0037] Термин «пластическая деформация», используемый в настоящем документе, означает неупругую деформацию материала при приложенном напряжении или напряжениях, которая вызывает остаточную деформацию материала сверх его предела 25 упругости.

25 [0038] Термин «уменьшение площади», используемый в настоящем документе, означает разность между площадью поперечного сечения образца титанового сплава перед пластической деформацией и площадью поперечного сечения образца титанового сплава после пластической деформации, причем поперечное сечение выбирается в 30 эквивалентном положении. Образец титанового сплава, используемый для оценки уменьшения площади, может быть, но не ограничен ими, любым из круглой заготовки (бilletta), прутка, плиты, стержня, проволоки, листа, прокатанного профиля и прессованного профиля.

35 [0039] Далее приведен вариант расчета уменьшения площади при пластическом деформировании круглой заготовки из титанового сплава диаметром 5 дюймов (127 мм) путем прокатки заготовки до круглого прутка диаметром 2,5 дюйма (63,5 мм). Площадь поперечного сечения круглой заготовки диаметром 5 дюймов составляет π (пи), умноженное на квадрат радиуса, или приблизительно $(3,1415) \times (2,5 \text{ дюйм})^2$, или 40 $19,625 \text{ дюйм}^2$. Площадь поперечного сечения круглого прутка диаметром 2,5 дюйма составляет приблизительно $(3,1415) \times (1,25)^2$, или $4,91 \text{ дюйма}^2$. Отношение площади поперечного сечения исходной заготовки к площади поперечного сечения прутка после прокатки составляет $4,91/19,625$, или 25% . Уменьшение площади составляет $100\%-25\%$, т.е. 75% -ное уменьшение площади.

45 [0040] Термин «эквивалентная пластическая деформация», используемый в настоящем документе, означает неупругую деформацию материала при приложенных напряжениях, которые вызывают деформацию материала сверх его предела упругости. Эквивалентная пластическая деформация может задействовать напряжения, которые могли бы приводить к определенному уменьшению площади, полученному при одноосной

деформации, но происходит так, что размеры образца сплава после деформации незначительно отличаются от размеров образца сплава до деформации. Например и без ограничения, для того чтобы подвергнуть штампованный осадкой заготовку из титанового сплава значительной пластической деформации, может использоваться многоосная (всесторонняя) ковка, вносящая в сплав дислокации, но без существенного изменения конечных размеров заготовки. В неограничительном варианте воплощения, при котором эквивалентная пластическая деформация составляет по меньшей мере 25%, действительное уменьшение площади может быть 5% или менее. В неограничительном варианте воплощения, при котором эквивалентная пластическая деформация составляет по меньшей мере 25%, действительное уменьшение площади может быть 1% или менее. Многоосная (всесторонняя) ковка - это метод, известный обычному специалисту в данной области техники, и поэтому в дальнейшем здесь не описывается.

[0041] В некоторых неограничительных вариантах воплощения согласно настоящему

изобретению титановый сплав может подвергаться пластическому деформированию до эквивалентной пластической деформации с более чем 25%-ым уменьшением площади и вплоть до 99%-го уменьшения площади. В некоторых неограничительных вариантах воплощения, в которых эквивалентная пластическая деформация составляет больше 25%-го уменьшения площади, по меньшей мере эквивалентная пластическая деформация с 25%-ым уменьшением площади в области альфа-бета-фаз происходит при окончании пластической деформации, и после пластической деформации титановый сплав не нагревают выше температуры бета-перехода (T_β) титанового сплава.

[0042] В одном неограничительном варианте воплощения способа по настоящему изобретению, и как в общих чертах показано на ФИГ. 3, пластическое деформирование

титанового сплава включает пластическое деформирование титанового сплава таким образом, что вся эквивалентная пластическая деформация происходит в области альфа-бета-фаз. Хотя на ФИГ. 3 показана постоянная температура пластической деформации в области альфа-бета-фаз, в рамках объема описанных здесь вариантов воплощения находится и то, что эквивалентная пластическая деформация с по меньшей мере 25%-ым уменьшением площади в области альфа-бета-фаз происходит при изменяющихся температурах. Например, титановый сплав может обрабатываться давлением в области альфа-бета-фаз в то время как температура сплава постепенно уменьшается. Также в рамках объема описанных здесь вариантов воплощения находится нагрев титанового сплава в процессе эквивалентной пластической деформации с по меньшей мере 25%-ым уменьшением площади в области альфа-бета-фаз так, чтобы поддерживалась

постоянная или почти постоянная температура, или ограниченное снижение температуры титанового сплава, при условии, что титановый сплав не нагревают до температуры бета-перехода титанового сплава или выше нее. В неограничительном варианте воплощения пластическое деформирование титанового сплава в области альфа-бета-фаз включает пластическое деформирование сплава в температурном диапазоне пластической деформации от чуть ниже температуры бета-перехода, или примерно 18°F (10°C) ниже температуры бета-перехода, до 400°F (222°C) ниже температуры бета-перехода. В другом неограничительном варианте воплощения пластическое деформирование титанового сплава в области альфа-бета-фаз включает пластическое деформирование сплава в температурном диапазоне пластической деформации от 400°F (222°C) ниже температуры бета-перехода до 20°F (11,1°C) ниже температуры бета-перехода. В следующем неограничительном варианте воплощения пластическое деформирование титанового сплава в области альфа-бета-фаз включает

пластическое деформирование сплава в температурном диапазоне пластической деформации от 50°F (27,8°C) ниже температуры бета-перехода до 400°F (222°C) ниже температуры бета-перехода.

[0043] Ссылаясь на схематичный график зависимости температуры от времени на

5 ФИГ. 4, другой неограничительный способ 30 по настоящему изобретению включает в себя признак, называемый в данном документе обработкой «через бета-переход». В неограничительных вариантах воплощения, которые включают в себя обработку через бета-переход, пластическая деформация (также называемая здесь «обработкой давлением») начинается с температуры титанового сплава при температуре бета-
10 перехода (T_β) титанового сплава или выше нее. Кроме того, при обработке через бета-переход пластическая деформация 32 включает пластическое деформирование титанового сплава от температуры 34, которая находится на уровне или выше температуры бета-перехода, до конечной температуры 24 пластической деформации, которая находится в области альфа-бета-фаз титанового сплава. Таким образом,
15 температура титанового сплава проходит «через» температуру бета-перехода в процессе пластической деформации 32. Кроме того, при обработке через бета-переход эквивалентная по меньшей мере 25%-ному уменьшению площади пластическая деформация происходит в области альфа-бета-фаз, и титановый сплав не нагревают до температуры на уровне или выше температуры бета-перехода (T_β) титанового сплава
20 после пластического деформирования титанового сплава в области альфа-бета-фаз. Схематичный график температура-время на ФИГ. 4 иллюстрирует, что неограничительные варианты воплощения раскрытых здесь способов термообработки титановых сплавов для придания им высокой прочности и высокой вязкости разрушения
25 отличаются от традиционных приемов термообработки для придания титановым сплавам высокой прочности и высокой вязкости разрушения. Например, традиционные приемы термообработки, как правило, требуют многостадийных термообработок и сложного оборудования для тщательного контролирования скоростей охлаждения сплава и поэтому дорогостоящи и не могут осуществляться на всем оборудовании для термообработки. Вместе с тем, варианты воплощения обработки, иллюстрируемые на
30 ФИГ. 4, не задействуют многостадийную термообработку и могут выполняться с использованием традиционного оборудования для термообработки.

[0044] В некоторых неограничительных вариантах воплощения способа по

настоящему изобретению пластическое деформирование титанового сплава при обработке через бета-переход включает пластическое деформирование титанового сплава в температурном диапазоне от 200°F (111°C) выше температуры бета-перехода титанового сплава до 400°F (222°C) ниже температуры бета-перехода, проходя через температуру бета-перехода в процессе пластической деформации. Автор изобретения определил, что этот температурный диапазон эффективен при условии, что (i) эквивалентная по меньшей мере 25%-му уменьшению площади пластическая деформация
35 происходит в области альфа-бета-фаз и (ii) титановый сплав не нагревают до температуры на уровне или выше температуры бета-перехода после пластической деформации в области альфа-бета-фаз.

[0045] В вариантах воплощения согласно настоящему изобретению титановый сплав

40 может пластически деформироваться различными методами, включая, но не ограничиваясь ими, ковку, ротационную ковку, объемную штамповку, многоосную (всестороннюю) ковку, периодическую прокатку, прокатку листового материала и прессование (выдавливанием), или сочетание двух или нескольких из этих методов. Пластическая деформация может быть реализована любым подходящим

технологическим методом обработки, известным сейчас или в дальнейшем обычному специалисту в данной области техники, при условии, что используемый метод обработки дает возможность пластического деформирования заготовки из титанового сплава в области альфа-бета-фаз по меньшей мере до эквивалентного 25%-ному уменьшению 5 площади.

[0046] Как указано ранее, в некоторых неограничительных вариантах воплощения способа по настоящему изобретению пластическая деформация титанового сплава по меньшей мере до эквивалентной 25%-му уменьшению площади, происходящая в области альфа-бета-фаз, существенно не изменяет конечные размеры титанового сплава. Этого

10 можно достичь таким методом, как, например, многоосная (всесторонняя) ковка. В других вариантах воплощения пластическая деформация включает действительное уменьшение площади поперечного сечения титанового сплава по окончании пластической деформации. Специалисту понятно, что уменьшение площади титанового сплава, происходящее в результате пластической деформации, по меньшей мере

15 эквивалентной уменьшению площади на 25%, может приводить, например, к действительному изменению исходной площади поперечного сечения титанового сплава, т.е. действительному уменьшению площади, где-то в пределах от 0% или 1% и вплоть до 25%. Кроме того, поскольку общая пластическая деформация может включать в себя пластическую деформацию, эквивалентную уменьшению площади до 99%,

20 действительные размеры заготовки после пластической деформации, эквивалентной уменьшению площади до 99%, могут давать действительное изменение исходной площади поперечного сечения титанового сплава где-то в пределах от 0% или 1% и вплоть до 99%.

[0047] Неограничительный вариант воплощения способа по настоящему изобретению

25 включает в себя охлаждение титанового сплава до комнатной температуры после пластического деформирования титанового сплава и перед термообработкой титанового сплава. Охлаждение может выполняться путем охлаждения с печью, охлаждения на воздухе, охлаждения в воде или любым другим подходящим методом охлаждения, известным сейчас или в дальнейшем обычному специалисту в данной области техники.

30 [0048] Аспект настоящего изобретения заключается в том, что после горячей обработки титанового сплава давлением согласно раскрытым здесь вариантам воплощения титановый сплав не нагревают до температуры бета-перехода или выше нее. Поэтому этап термообработки не происходит при температуре бета-перехода сплава или выше нее. В некоторых неограничительных вариантах воплощения

35 термообработка включает нагрев титанового сплава при температуре («температуре термообработки») в диапазоне от 900°F (482°C) до 1500°F (816°C) в течение времени («времени термообработки») в диапазоне от 0,5 часа до 24 часов. В других неограничительных вариантах воплощения, для того чтобы увеличить вязкость разрушения, температура термообработки может быть выше конечной температуры

40 пластической деформации, но меньше температуры бета-перехода сплава. В другом неограничительном варианте воплощения температура термообработки (T_h) меньше или равна температуре бета-перехода минус 20°F (11,1°C), т.е. $T_h \leq (T_\beta - 20°F)$. В другом неограничительном варианте воплощения температура термообработки (T_h) меньше

45 или равна температуре бета-перехода минус 50°F (27,8°C), т.е. $T_h \leq (T_\beta - 50°F)$. В еще одном неограничительном варианте воплощения температура термообработки может находиться в диапазоне от по меньшей мере 900°F (482°C) до температуры бета-перехода минус 20°F (11,1°C) или в диапазоне от по меньшей мере 900°F (482°C) до температуры

бета-перехода минус 50°F (27,8°C). Понятно, что время термообработки может быть больше 24 часов, например, если толщина детали требует длительного времени нагрева.

[0049] Другой неограничительный вариант воплощения способа по настоящему изобретению включает в себя непосредственное старение после пластического

- 5 деформирования титанового сплава, причем титановый сплав охлаждают или нагревают непосредственно до температуры термообработки после пластического деформирования титанового сплава в области альфа-бета-фаз. Предполагается, что в некоторых неограничительных вариантах воплощения настоящего способа, в которых титановый сплав охлаждают непосредственно до температуры термообработки после пластической
- 10 деформации, скорость охлаждения не будет оказывать значительного неблагоприятного влияния на свойства прочности и вязкости разрушения, достигнутые посредством этапа термообработки. В неограничительных вариантах воплощения настоящего способа, в которых титановый сплав подвергают термообработке при температуре термообработки выше конечной температуры пластической деформации, но ниже
- 15 температуры бета-перехода, титановый сплав может быть непосредственно нагрет до температуры термообработки после пластического деформирования титанового сплава в области альфа-бета-фаз.

[0050] Некоторые неограничительные варианты воплощения способа термомеханической обработки по настоящему изобретению включают применение

- 20 такой обработки к титановому сплаву, который способен сохранять β-фазу при комнатной температуре. По существу, титановые сплавы, которые могут быть преимущественно обработаны посредством различных вариантов воплощения способов по настоящему изобретению, включают в себя бета-титановые сплавы, метастабильные бета-титановые сплавы, псевдо-бета-титановые сплавы, альфа-бета-титановые сплавы
- 25 и псевдо-альфа-титановые сплавы. Предполагается, что раскрытие здесь способами могут также увеличивать прочность и вязкость разрушения альфа-титановых сплавов, поскольку, как указано ранее, даже марки технически чистого (ТЧ) титана содержат малые концентрации β-фазы при комнатной температуре.

[0051] В других неограничительных вариантах воплощения способов по настоящему

- 30 изобретению эти способы могут использоваться для обработки титановых сплавов, обладающих способностью сохранения β-фазы при комнатной температуре и обладающих способностью сохранения или выделения α-фазы после старения. Эти сплавы включают в себя, но не ограничены ими, основные категории бета-титановых сплавов, альфа-бета-титановых сплавов и альфа-титановых сплавов, содержащих
- 35 небольшие объемные доли β-фазы.

[0052] Неограничительные примеры титановых сплавов, которые можно обрабатывать, используя варианты воплощения способов по настоящему изобретению, включают в себя альфа/бета титановые сплавы, такие как, например, сплав Ti-6Al-4V (UNS номера R56400 и R54601) и сплав Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo (UNS номера R54620 и

- 40 R54621); псевдо-бета-титановые сплавы, такие как, например, сплав Ti-10V-2Fe-3Al (UNS R54610); и метастабильные бета-титановые сплавы, такие как, например, сплав Ti-15Mo (UNS R58150) и сплав Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr (UNS не присвоен).

[0053] После термообработки титанового сплава согласно некоторым

- 45 неограничительным вариантам воплощения, раскрытым здесь, титановый сплав может иметь предел прочности на растяжение в диапазоне от 138 ksi до 179 ksi. Обсуждаемые в данном документе свойства предела прочности на растяжение могут быть измерены согласно описанию стандарта ASTM E8-04, «Стандартные методы испытаний металлических материалов на растяжение». Кроме того, после термообработки

титанового сплава согласно некоторым неограничительным вариантам воплощения способов по настоящему изобретению титановый сплав может обладать трещиностойкостью K_{Ic} в диапазоне от 59 ksi·дюйм^{1/2} до 100 ksi·дюйм^{1/2}. Значения трещиностойкости K_{Ic} , обсуждаемые в данном документе, могут быть измерены согласно описанию стандарта ASTM E399-08, «Стандартные методы испытаний металлических материалов на трещиностойкость K_{Ic} при линейно-упругой плоской деформации».

Кроме того, после термообработки титанового сплава согласно некоторым неограничительным вариантам воплощения в рамках настоящего изобретения титановый сплав может обладать пределом текучести в диапазоне от 134 ksi до 170 ksi. Кроме того, после термообработки титанового сплава согласно некоторым неограничительным вариантам воплощения в рамках настоящего изобретения титановый сплав может обладать относительным удлинением в диапазоне от 4,4% до 20,5%.

[0054] В общем, преимущественные диапазоны прочности и вязкости разрушения у титановых сплавов, которых можно достичь, применяя на практике варианты воплощения способов по настоящему изобретению, включают, но не ограничены ими: пределы прочности на растяжение от 140 ksi до 180 ksi при трещиностойкости в диапазоне K_{Ic} от 40 ksi·дюйм^{1/2} до 100 ksi·дюйм^{1/2} или пределы прочности на растяжение от 140 ksi до 160 ksi при трещиностойкости в диапазоне K_{Ic} от 60 ksi·дюйм^{1/2} до 80 ksi·дюйм^{1/2}. В других неограничительных вариантах воплощения преимущественные диапазоны прочности и вязкости разрушения включают пределы прочности на растяжение от 160 ksi до 180 ksi при трещиностойкости в диапазоне K_{Ic} от 40 ksi·дюйм^{1/2} до 60 ksi·дюйм^{1/2}. Другие преимущественные диапазоны прочности и вязкости разрушения, которых можно достичь, применяя на практике варианты воплощения способов по настоящему изобретению, включают, но не ограничены ими: пределы прочности на растяжение от 135 ksi до 180 ksi при трещиностойкости в диапазоне K_{Ic} от 55 ksi·дюйм^{1/2} до 100 ksi·дюйм^{1/2}; пределы прочности на растяжение от 160 ksi до 180 ksi при трещиностойкости в диапазоне K_{Ic} от 60 ksi·дюйм^{1/2} до 90 ksi·дюйм^{1/2}; и пределы прочности на растяжение от 135 ksi до 160 ksi при значениях трещиностойкости в диапазоне K_{Ic} от 85 ksi·дюйм^{1/2} до 95 ksi·дюйм^{1/2}.

[0055] В неограничительном варианте воплощения способа по настоящему изобретению, после термообработки титанового сплава последний имеет средний предел прочности на растяжение по меньшей мере 166 ksi, средний предел текучести по меньшей мере 148 ksi, относительное удлинение по меньшей мере 6% и трещиностойкость K_{Ic} по меньшей мере 65 ksi·дюйм^{1/2}. Другие неограничительные варианты воплощения способов по настоящему изобретению обеспечивают получение термообработанного титанового сплава, имеющего предел прочности на растяжение по меньшей мере 150 ksi и трещиностойкость K_{Ic} по меньшей мере 70 ksi·дюйм^{1/2}. Другие неограничительные варианты воплощения способов по настоящему изобретению обеспечивают получение термообработанного титанового сплава, имеющего предел прочности на растяжение по меньшей мере 135 ksi и трещиностойкость K_{Ic} по меньшей мере 55 ksi·дюйм^{1/2}.

[0056] Неограничительный способ по настоящему изобретению термомеханической обработки титанового сплава включает в себя обработку давлением (т.е. пластическое деформирование) титанового сплава в температурном диапазоне от 200°F (111°C) выше температуры бета-перехода титанового сплава до 400°F (222°C) ниже температуры

- 5 бета-перехода. В процессе последней части этапа обработки давлением эквивалентная пластическая деформация с по меньшей мере 25%-ым уменьшением площади происходит в области альфа-бета-фаз титанового сплава. После этапа обработки давлением титановый сплав не нагревают выше температуры бета-перехода. В неограничительных вариантах воплощения, после этапа обработки давлением титановый сплав может
- 10 подвергаться термообработке в диапазоне температур термообработки между 900°F (482°C) и 1500°F (816°C) в течение времени термообработки между 0,5 часа и 24 часами.

[0057] В некоторых неограничительных вариантах воплощения согласно настоящему изобретению обработка титанового сплава давлением обеспечивает эквивалентную пластическую деформацию с более чем 25%-ым уменьшением площади и вплоть до 15 99%-го уменьшения площади, причем эквивалентная пластическая деформация в по меньшей мере 25% происходит на этапе обработки давлением в области альфа-бета-фаз титанового сплава, и после пластической деформации титановый сплав не нагревают выше температуры бета-перехода. Неограничительный вариант воплощения включает обработку давлением титанового сплава в области альфа-бета-фаз. В других 20 неограничительных вариантах воплощения обработка давлением включает обработку титанового сплава давлением при температуре на уровне или выше температуры бета-перехода до конечной температуры обработки давлением в области альфа-бета-фаз, причем обработка давлением включает в себя эквивалентную пластическую деформацию с 25%-ым уменьшением площади в области альфа-бета-фаз титанового сплава, и после 25 пластической деформации титановый сплав не нагревают выше температуры бета-перехода.

[0058] Для определения термомеханических свойств титановых сплавов, пригодных для определенных видов применения в аэрокосмической и авиационной отрасли, собирали данные механических испытаний титановых сплавов, которые обрабатывались 30 согласно приемам, ранее используемым в компании ATI Allvac, и данные из технической литературы. Как употребляется здесь, сплав имеет механические свойства, «пригодные» для некоего конкретного применения, если вязкость разрушения и прочность сплава имеют по меньшей мере такую величину или находятся в таком диапазоне, как требуется для этого применения. Были собраны механические свойства для следующих сплавов, 35 которые пригодны для определенных видов применения в аэрокосмической и авиационной отрасли: Ti-10V-2Fe-3Al (Ti 10-2-3; UNS R54610), Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr (Ti 5-5-5-3; UNS не присвоен), сплав Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo (Ti 6-2-4-2; UNS номера R54620 и R54621), Ti-6Al-4V (Ti 6-4; UNS номера R56400 и R54601), Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo (Ti 6-2-4-6; UNS R56260), Ti-6Al-2Sn-2Zr-2Cr-2Mo-0,25Si (Ti 6-22-22; AMS 4898) и Ti-3Al-8V-6Cr-40 4Zr-4Mo (Ti 3-8-6-4-4; AMS 4939, 4957, 4958). Состав каждого из этих сплавов указан в литературе и хорошо известен. Типичные диапазоны химического состава в весовых процентах неограничительных примерных титановых сплавов, которые поддаются обработке раскрытыми здесь способами, приведены в таблице 1. Понятно, что сплавы, представленные в таблице 1, - только неограничительные примеры сплавов, которые 45 могут проявлять увеличенные прочность и вязкость разрушения при обработке согласно раскрытым здесь вариантам воплощения, и что другие титановые сплавы, известные специалистам сейчас или впоследствии, также находятся в рамках раскрытых здесь вариантов воплощения.

Таблица 1 (вес. %)								
	Ti 10-2-3	Ti-5-5-3	Ti 6-2-4-2	Ti 6-4	Ti 6-2-4-6	Ti 6-22-22	Ti 3-8-6-4-4	Ti-15Mo
Al	2,6-3,4	4,0-6,3	5,5-6,5	5,5-6,75	5,5-6,5	5,5-6,5	3,0-4,0	
V	9,0-11,0	4,5-5,9		3,5-4,5			7,5-8,5	
Mo		4,5-5,9	1,80-2,20		5,50-6,50	1,5-2,5	3,5-4,5	14,00-16,00
Cr		2,0-3,6				1,5-2,5	5,5-6,5	
Cr + Mo						4,0-5,0		
Zr		0,01-0,08	3,60-4,40		3,50-4,50	1,5-2,5	3,5-4,5	
Sn			1,80-2,20		1,75-2,25	1,5-2,5		
Si						0,2-0,3		
C	0,05 макс	0,01-0,25	0,05 макс	0,1 макс	0,04 макс	0,05 макс	0,05 макс	0,10 макс
N	0,05 макс		0,05 макс	0,05 макс	0,04 макс	0,04 макс		0,05 макс
O	0,13 макс	0,03-0,25	0,15 макс	0,20 макс	0,15 макс	0,14 макс	0,14	
H	0,015 макс		0,0125 макс	0,015 макс	0,0125 макс	0,01 макс	0,020 макс	0,015 макс
Fe	1,6-2,2	0,2-0,8	0,25 макс	0,40 макс	0,15 макс		0,3 макс	0,1 макс
Ti	ост.	ост.	ост.	ост.	ост.	ост.	ост.	ост.

[0059] Пригодные сочетания трещиностойкости и предела текучести, проявленные указанными сплавами при обработке с использованием технологически сложных и дорогих процессов термомеханической обработки уровня техники, представлены графически на ФИГ. 5. На ФИГ. 5 видно, что нижняя граница области графика, включающей пригодные сочетания трещиностойкости и предела текучести, может быть приблизительно выражена линией $y=-0,9x+173$, где «у» - трещиностойкость K_{Ic} в единицах $\text{ksi}\cdot\text{дюйм}^{1/2}$, а «х» - предел текучести (ПТ) в единицах ksi. Данные, представленные в приведенных здесь ниже Примерах 1 и 3 (см. также ФИГ. 6), подтверждают, что варианты воплощения способа обработки титановых сплавов согласно настоящему изобретению, включающие в себя описанные здесь пластическое деформирование и термообработку сплавов, приводят к сочетаниям трещиностойкости K_{Ic} и предела текучести, которые сравнимы с теми, которых достигают, используя дорогие и технологически довольно сложные методы отработки уровня техники. Иначе говоря, со ссылкой на ФИГ. 5, на основании результатов, достигнутых путем выполнения некоторых вариантов воплощения способа по настоящему изобретению, может быть получен титановый сплав, проявляющий трещиностойкость и предел текучести в соответствии с уравнением (1).

$$K_{Ic} \geq -(0,9)\Pi T + 173 \quad (1)$$

[0060] Далее, на ФИГ. 5 видно, что верхняя граница области графика, включающей пригодные сочетания трещиностойкости и предела текучести, может быть приблизительно выражена линией $y=-0,9x+217,6$, где «у» - трещиностойкость K_{Ic} в единицах $\text{ksi}\cdot\text{дюйм}^{1/2}$, а «х» - предел текучести (ПТ) в единицах ksi. Поэтому, на основании результатов, достигнутых путем выполнения вариантов воплощения способа по настоящему изобретению, настоящий способ может использоваться для производства титанового сплава, проявляющего трещиностойкость и предел текучести в рамках ограниченной области на ФИГ. 5, которая может быть описана в соответствии с уравнением (2).

$$217,6 - (0,9)\Pi T \geq K_{Ic} \geq 173 - (0,9)\Pi T \quad (2)$$

[0061] Согласно неограничительному аспекту настоящего изобретения варианты воплощения способа по настоящему изобретению, включающие этапы пластической деформации и термообработки, дают в результате титановые сплавы, имеющие предел

текучести и трещиностойкость, которые по меньшей мере сравнимы с теми же сплавами, которые обработаны с использованием достаточно дорогих и технологически сложных методов термомеханической обработки уровня техники.

- [0062] Кроме того, как показывают данные, приведенные далее в Примере 1 и 5 таблицах 1 и 2, обработка титанового сплава Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr способом по настоящему изобретению давала в результате титановый сплав, проявляющий механические свойства, превышающие те, которые получены термомеханической обработкой уровня техники. См. ФИГ. 6. Иначе говоря, со ссылкой на ограниченную 10 область, показанную на ФИГ. 5 и 6, включающую сочетания предела текучести и трещиностойкости, достигнутые при термомеханической обработке уровня техники, некоторые варианты воплощения способа по настоящему изобретению дают титановые сплавы, у которых трещиностойкость и предел текучести связаны в соответствии с 15 уравнением (3).

$$K_{Ic} \geq 217,6 - (0,9)PT \quad (3)$$

- [0063] Следующие примеры предназначены для подробного описания 15 неограничительных вариантов воплощения без ограничения объема настоящего изобретения. Обычному специалисту в данной области техники будет понятно, что возможны изменения Примеров в объеме изобретения, который определяется 20 исключительно формулой изобретения.

ПРИМЕР 1

- [0064] 5-дюймовую круглую заготовку из сплава Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr (Ti 5-5-5-3), от 25 компании ATI Allvac, г. Монро, шт. Северная Каролина, прокатывали в 2,5-дюймовый пруток при начальной температуре примерно 1450°F (787,8°C) в области альфа-бета-фаз. Температура бета-перехода сплава Ti 5-5-5-3 составляла примерно 1530°F (832°C). Сплав Ti 5-5-5-3 имел средний химический состав в слитке 5,02 весового процента 30 алюминия, 4,87 весового процента ванадия, 0,41 весового процента железа, 4,90 весового процента молибдена, 2,85 весового процента хрома, 0,12 весового процента кислорода, 0,09 весового процента циркония, 0,03 весового процента кремния, остальное - титан и неизбежные примеси. Конечная температура обработки давлением составляла 1480°F (804,4°C), также в области альфа-бета-фаз и не меньше, чем 400°F (222°C) ниже температуры бета-перехода сплава. Уменьшение диаметра сплава соответствовало 75%-му уменьшению площади сплава в области альфа-бета-фаз.

- После прокатки сплав охлаждали на воздухе до комнатной температуры. Образцы 35 охлажденного сплава подвергали термообработке при нескольких температурах термообработки в течение различных времен термообработки. Механические свойства образцов термообработанного сплава измеряли в продольном (L) направлении и в поперечном направлении (T). Времена термообработки и температуры термообработки, использованные для различных опытных образцов, и результаты испытаний на 40 растяжение и трещиностойкость (K_{Ic}) для образцов в продольном направлении приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Условия термообработки и свойства в продольном направлении

№:	Температура термообработки ($^{\circ}\text{F}/^{\circ}\text{C}$)	Время термообработки (часы)	Предел прочности на растяжение (ksi)	Предел текучести (ksi)	Относительное удлинение (%)	K_{Ic} ($\text{ksi} \cdot \text{дюйм}^{1/2}$)
1	1200/649	2	178,7	170,15	11,5	65,55
2	1200/649	4	180,45	170,35	11	59,4
3	1200/649	6	174,45	165,4	12,5	62,1
4	1250/677	4	168,2	157,45	14,5	79,4
5	1300/704	2	155,8	147	16	87,75
6	1300/704	6	153	143,7	17	87,75
7	1350/732	4	145,05	137,95	20	95,55
8	1400/760	2	140,25	134,8	20	99,25
9	1400/760	6	137,95	133,6	20,5	98,2

[0065] Времена термообработки, температуры термообработки и результаты испытаний на растяжение, измеренные в поперечном направлении образцов, приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Условия термообработки и свойства в поперечном направлении

№:	Температура термообработки ($^{\circ}\text{F}/^{\circ}\text{C}$)	Время термообработки (часы)	Предел прочности на растяжение (ksi)	Предел текучести (ksi)	Относительное удлинение (%)
1	1200/649	2	193,25	182,8	4,4
2	1200/649	4	188,65	179,25	4,5
3	1200/649	6	186,35	174,85	6,5
4	1250/677	4	174,6	163,3	4,5
5	1300/704	2	169,15	157,35	6,5
6	1300/704	6	162,65	151,85	7
7	1350/732	4	147,7	135,25	9
8	1400/760	2	143,65	131,6	12
9	1400/760	6	147	133,7	15

[0066] Типичные целевые показатели для свойств сплава Ti 5-5-5-3, используемого в аэрокосмической отрасли, включают средний предел прочности на растяжение по меньшей мере 150 ksi и значение минимальной трещиностойкости K_{Ic} по меньшей мере

70 $\text{ksi} \cdot \text{дюйм}^{1/2}$. Согласно Примеру 1 эти целевые механические свойства были достигнуты с помощью сочетаний времени и температуры термообработки, приведенных в таблице 2 для образцов 4-6.

ПРИМЕР 2

[0067] Экземпляры образца №4 из Примера 1 разрезали поперек приблизительно в середине каждого экземпляра и травили реактивом Кроля для исследования микроструктуры, полученной после прокатки и термообработки. ФИГ. 7А - оптическая микрофотография (100-кратное увеличение) в продольном направлении, а ФИГ. 7В - оптическая микрофотография (100-кратное увеличение) в поперечном направлении препрессентативного приготовленного экземпляра. Микроструктура, полученная после прокатки и термообработки при 1250°F (677°C) в течение 4 часов, - мелкодисперсная α -фаза, распределенная в матрице β -фазы.

ПРИМЕР 3

[0068] Пруток из сплава Ti-15Mo, полученный от компании ATI Allvac, пластически

деформировали до 75%-го уменьшения площади при начальной температуре 1400°F (760,0°C), которая находится в области альфа-бета-фаз. Температура бета-перехода сплава Ti-15Mo составляла примерно 1475°F (801,7°C). Конечная температура обработки давлением сплава составляла примерно 1200°F (648,9°C), которая была не меньше, чем 5 400°F (222°C) ниже температуры бета-перехода сплава. После обработки давлением пруток Ti-15Mo подвергали старению при 900°F (482,2°C) в течение 16 часов. После старения пруток Ti-15Mo имел пределы прочности на растяжение в диапазоне 178-188 ksi, пределы текучести в диапазоне 170-175 ksi и значения трещиностойкости K_{Ic} 10 приблизительно 30 ksi·дюйм^{1/2}.

ПРИМЕР 4

[0069] 5-дюймовую круглую заготовку из сплава Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr (Ti 5-5-5-3) прокатывали в 2,5-дюймовый пруток при начальной температуре примерно 1650°F (889°C) в области альфа-бета-фаз. Температура бета-перехода сплава Ti 5-5-5-3 15 составляет примерно 1530°F (832°C). Конечная температура обработки давлением составляет 1330°F (721°C), которая находится в области альфа-бета-фаз и не меньше, чем 400°F (222°C) ниже температуры бета-перехода сплава. Уменьшение в диаметре сплава соответствует 75%-му уменьшению площади. Температура пластической деформации уменьшалась в процессе пластической деформации и проходила через 20 температуру бета-перехода. По мере остывания сплава в процессе пластической деформации по меньшей мере 25%-ое уменьшение площади происходило в области альфа-бета-фаз. После такого по меньшей мере 25%-го уменьшения площади в области альфа-бета-фаз сплав не нагревали выше температуры бета-перехода. После прокатки сплав охлаждали на воздухе до комнатной температуры. Сплав подвергали старению 25 при 1300°F (704°C) в течение 2 часов.

[0070] Настоящее изобретение было описано со ссылками на различные примерные, иллюстративные и неограничительные варианты воплощения. Однако обычные специалисты в данной области техники должны признать, что могут быть проделаны различные замены, изменения или сочетания любых из вариантов раскрытых 30 воплощения изобретения (или его частей) без отступления от объема изобретения, определяемого исключительно формулой изобретения. Таким образом, предполагается и понятно, что настоящее изобретение охватывает дополнительные варианты воплощения, явно не изложенные в настоящем документе. Такие варианты воплощения могут быть получены, например, путем сочетания, изменения и/или модификации любых из раскрытых этапов, ингредиентов, составляющих, компонентов, элементов, 35 признаков, аспектов и т.п. описанных в данном документе вариантов воплощения. Таким образом, изобретение ограничено не описанием различных примерных, иллюстративных и неограничительных вариантов воплощения, а исключительно пунктами формулы изобретения. Таким образом, заявитель оставляет за собой право 40 в процессе рассмотрения вносить изменения в формулу изобретения для добавления признаков, по-разному описанных в настоящем документе.

Формула изобретения

- Способ термомеханической обработки титанового сплава, включающий:
обратную обработку титанового сплава давлением, включающую пластическое 45 деформирование титанового сплава при температуре в области альфа-бета фаз титанового сплава до эквивалентной пластической деформации, причем эта эквивалентная пластическая деформация эквивалентна по меньшей мере 25%-ному уменьшению площади поперечного сечения титанового сплава, которое происходит

в температурном диапазоне пластической деформации от температуры ниже температуры бета-перехода титанового сплава до 222°C ниже температуры бета-перехода титанового сплава, и при этом после пластического деформирования титанового сплава при температуре в области альфа-бета фаз температура титанового сплава не достигает и не превышает упомянутой температуры бета-перехода титанового сплава; и

одноступенчатую термообработку титанового сплава при температуре термообработки, меньшей или равной температуре бета-перехода минус 11,1°C, в течение времени, достаточного для получения термообработанного сплава, причем трещиностойкость (K_{Ic}) термообработанного сплава связана с пределом текучести (ПТ) термообработанного сплава согласно следующему уравнению:

$$K_{Ic} \geq 173 - (0,9)\text{ПТ}$$

2. Способ по п. 1, отличающийся тем, что трещиностойкость (K_{Ic})

термообработанного сплава связана с пределом текучести (ПТ) термообработанного сплава согласно следующему уравнению:

$$217,6 - (0,9)\text{ПТ} \geq K_{Ic} \geq 173 - (0,9)\text{ПТ}$$

3. Способ по п. 1, отличающийся тем, что трещиностойкость (K_{Ic})

термообработанного сплава связана с пределом текучести (ПТ) термообработанного сплава согласно следующему уравнению:

$$K_{Ic} \geq 217,6 - (0,9)\text{ПТ}$$

4. Способ по п. 1, отличающийся тем, что осуществляют пластическое деформирование титанового сплава в области альфа-бета фаз, включающее пластическое деформирование титанового сплава до неупругой деформации в диапазоне от более чем 25%-ного до 99%-ного уменьшения площади титанового сплава.

5. Способ по п. 1, отличающийся тем, что осуществляют пластическое деформирование титанового сплава до эквивалентной пластической деформации, эквивалентной неупругой деформации титанового сплава с по меньшей мере 25%-ным уменьшением площади в температурном диапазоне от температуры на 11,1°C ниже температуры бета-перехода до температуры на 222°C ниже температуры бета-перехода.

6. Способ по п. 1, отличающийся тем, что перед пластическим деформированием титанового сплава дополнительно осуществляют пластическое деформирование титанового сплава при температуре бета-перехода или выше нее и через температуру бета-перехода.

7. Способ по п. 6, отличающийся тем, что осуществляют пластическое деформирование титанового сплава при температуре бета-перехода или выше нее, включающее пластическое деформирование титанового сплава в температурном диапазоне от температуры на 111°C выше температуры бета-перехода до температуры бета-перехода.

8. Способ по п. 1, отличающийся тем, что он дополнительно включает охлаждение титанового сплава до комнатной температуры после пластического деформирования титанового сплава и перед термообработкой титанового сплава.

9. Способ по п. 1, отличающийся тем, что он дополнительно включает охлаждение титанового сплава до температуры термообработки после пластического деформирования титанового сплава и перед термообработкой титанового сплава.

10. Способ по п. 1, отличающийся тем, что осуществляют термообработку титанового сплава, включающую нагревание титанового сплава до температуры термообработки в диапазоне от 482°C до температуры бета-перехода минус 11,1°C в течение времени

от 0,5 до 24 часов.

11. Способ по п. 1, отличающийся тем, что осуществляют пластическое деформирование титанового сплава, включающее по меньшей мере один из следующих процессов: ковка, ротационная ковка, объемная штамповка, многоосная ковка, 5 периодическая прокатка, прокатка листового материала и прессование титанового сплава.

12. Способ по п. 1, отличающийся тем, что осуществляют пластическое деформирование титанового сплава до эквивалентной пластической деформации с действительным уменьшением площади поперечного сечения титанового сплава.

10 13. Способ по п. 1, отличающийся тем, что осуществляют обработку титанового сплава давлением с действительным уменьшением площади поперечного сечения титанового сплава на 5% или менее.

15 14. Способ по п. 4, отличающийся тем, что пластическое деформирование титанового сплава включает действительное уменьшение площади поперечного сечения титанового сплава.

15 15. Способ по п. 1, отличающийся тем, что подвергаемый обработке давлением титановый сплав представляет собой титановый сплав, обладающий способностью сохранять бета-фазу при комнатной температуре.

20 16. Способ по п. 15, отличающийся тем, что подвергаемый обработке давлением титановый сплав выбран из титанового бета-сплава, метастабильного титанового бета-сплава, титанового альфа-бета сплава и псевдо-альфа-титанового сплава.

17. Способ по п. 15, отличающийся тем, что подвергаемый обработке давлением титановый сплав представляет собой сплав Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr.

25 18. Способ по п. 15, отличающийся тем, что подвергаемый обработке давлением титановый сплав представляет собой сплав Ti-15Mo.

19. Способ по п. 1, отличающийся тем, что осуществляют термообработку, после которой титановый сплав имеет предел прочности на разрыв от 138 до 179 ksi.

20 20. Способ по п. 1, отличающийся тем, что осуществляют термообработку, после которой титановый сплав имеет трещиностойкость K_{Ic} от 59 до 100 ksi·дюйм^{1/2}.

30 21. Способ по п. 1, отличающийся тем, что осуществляют термообработку, после которой титановый сплав имеет предел текучести от 134 до 170 ksi.

22. Способ по п. 1, отличающийся тем, что осуществляют термообработку, после которой титановый сплав имеет относительное удлинение в диапазоне от 4,4% до 20,5%.

35 23. Способ по п. 1, отличающийся тем, что осуществляют термообработку, после которой титановый сплав имеет средний предел прочности на разрыв по меньшей мере 166 ksi, средний предел текучести по меньшей мере 148 ksi, относительное удлинение по меньшей мере 6% и трещиностойкость K_{Ic} по меньшей мере 65 ksi·дюйм^{1/2}.

40 24. Способ по п. 1, отличающийся тем, что осуществляют термообработку, после которой титановый сплав имеет предел прочности на разрыв по меньшей мере 150 ksi и трещиностойкость K_{Ic} по меньшей мере 70 ksi·дюйм^{1/2}.

45 25. Способ по п. 1, отличающийся тем, что обработку титанового сплава давлением осуществляют до конечной температуры пластической деформации, которая является температурой титанового сплава при окончании пластического деформирования титанового сплава и перед термообработкой титанового сплава.

26. Способ по п. 25, отличающийся тем, что температура термообработки меньше, чем конечная температура пластической деформации.

27. Способ по п. 25, отличающийся тем, что температура термообработки больше,

чем конечная температура пластической деформации, и меньше, чем температура бета-перехода титанового сплава.

28. Способ по п. 1, отличающийся тем, что эквивалентная пластическая деформация с по меньшей мере 25%-ным уменьшением площади происходит в температурном диапазоне пластической деформации от 10°C ниже температуры бета-перехода до 222°C ниже температуры бета-перехода.

29. Способ термомеханической обработки титанового сплава, включающий:

обработку титанового сплава давлением в температурном диапазоне обработки давлением от 111°C выше температуры бета-перехода титанового сплава до 222°C ниже температуры бета-перехода титанового сплава, причем по меньшей мере 25%-ное уменьшение площади титанового сплава происходит в области альфа-бета фаз титанового сплава; и при этом температура титанового сплава не достигает и не превышает температуры бета-перехода после упомянутого по меньшей мере 25%-ного уменьшения площади титанового сплава в области альфа-бета фаз титанового сплава;

15 и

одноступенчатую термообработку титанового сплава при температуре термообработки от 482°C до температуры бета-перехода минус 11,1°C в течение времени, достаточного для получения термообработанного сплава, имеющего трещиностойкость (K_{Ic}), связанную с пределом текучести (ПТ) термообработанного сплава согласно 20 следующему уравнению: $K_{Ic} \geq 173 - (0,9)PT$.

30. Способ по п. 29, отличающийся тем, что термообработку осуществляют в течение от 0,5 до 24 часов.

31. Способ по п. 29, отличающийся тем, что обработку титанового сплава давлением осуществляют с уменьшением площади поперечного сечения от более чем 25% до 99%.

25 32. Способ по п. 29, отличающийся тем, что осуществляют обработку титанового сплава давлением, включающую обработку титанового сплава давлением в области альфа-бета фаз.

33. Способ по п. 29, отличающийся тем, что осуществляют обработку титанового сплава давлением, включающую обработку давлением от температуры бета-перехода или выше нее до конечной температуры обработки давлением в области альфа-бета фаз.

30 34. Способ по п. 29, отличающийся тем, что он дополнительно включает охлаждение титанового сплава до комнатной температуры после обработки титанового сплава давлением и перед термообработкой титанового сплава.

35 35. Способ по п. 29, отличающийся тем, что он дополнительно включает после обработки титанового сплава давлением охлаждение титанового сплава до температуры термообработки в пределах температурного диапазона термообработки.

36. Способ по п. 29, отличающийся тем, что подвергаемый обработке давлением титановый сплав представляет собой титановый сплав, обладающий способностью 40 сохранять бета-фазу при комнатной температуре.

37. Способ по п. 29, отличающийся тем, что осуществляют термообработку, после которой титановый сплав имеет средний предел прочности на разрыв по меньшей мере 166 ksi, средний предел текучести по меньшей мере 148 ksi, трещиностойкость K_{Ic} по

45 меньшей мере $65 \text{ ksi} \cdot \text{дюйм}^{1/2}$ и относительное удлинение по меньшей мере 6%.

38. Способ по п. 29, отличающийся тем, что трещиностойкость (K_{Ic}) термообработанного сплава связана с пределом текучести (ПТ) термообработанного сплава согласно следующему уравнению:

$$217,6 - (0,9)ПТ \geq K_{Ic} \geq 173 - (0,9)ПТ$$

39. Способ по п. 29, отличающийся тем, что трещиностойкость (K_{Ic})

термообработанного сплава связана с пределом текучести (ПТ) термообработанного сплава согласно следующему уравнению:

$$K_{Ic} \geq 217,6 - (0,9)ПТ$$

40. Способ термомеханической обработки титанового сплава, включающий:

обработку титанового сплава давлением, включающую пластическое

деформирование титанового сплава в области альфа-бета фаз для обеспечения

эквивалентной пластической деформации, причем эта эквивалентная пластическая

деформация эквивалентна по меньшей мере 25%-ному уменьшению площади

поперечного сечения титанового сплава, которое происходит в температурном

диапазоне пластической деформации от температуры ниже температуры бета-перехода титанового сплава до температуры на 222°C ниже температуры бета-перехода

титанового сплава, с получением титанового сплава, обладающего способностью

сохранения бета-фазы при комнатной температуре, и при этом после пластического

деформирования титанового сплава при температуре в области альфа-бета фаз

температура титанового сплава не достигает и не превышает упомянутой температуры бета-перехода титанового сплава; и

одноступенчатую термообработку титанового сплава при температуре

термообработки не выше температуры бета-перехода минус 11,1°C в течение времени, достаточного для получения титанового сплава со средним пределом прочности на разрыв по меньшей мере 150 ksi и трещиностойкостью K_{Ic} по меньшей мере 70 ksi·

дюйм^{1/2}.

41. Способ по п. 40, отличающийся тем, что термообработку осуществляют в течение от 0,5 до 24 часов.

30

35

40

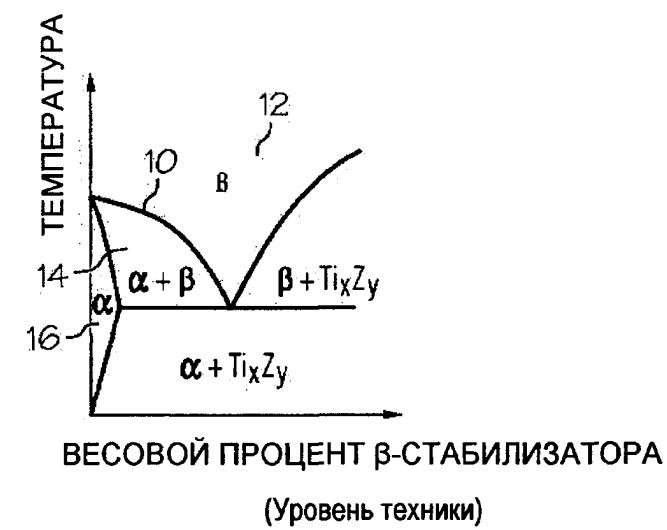
45



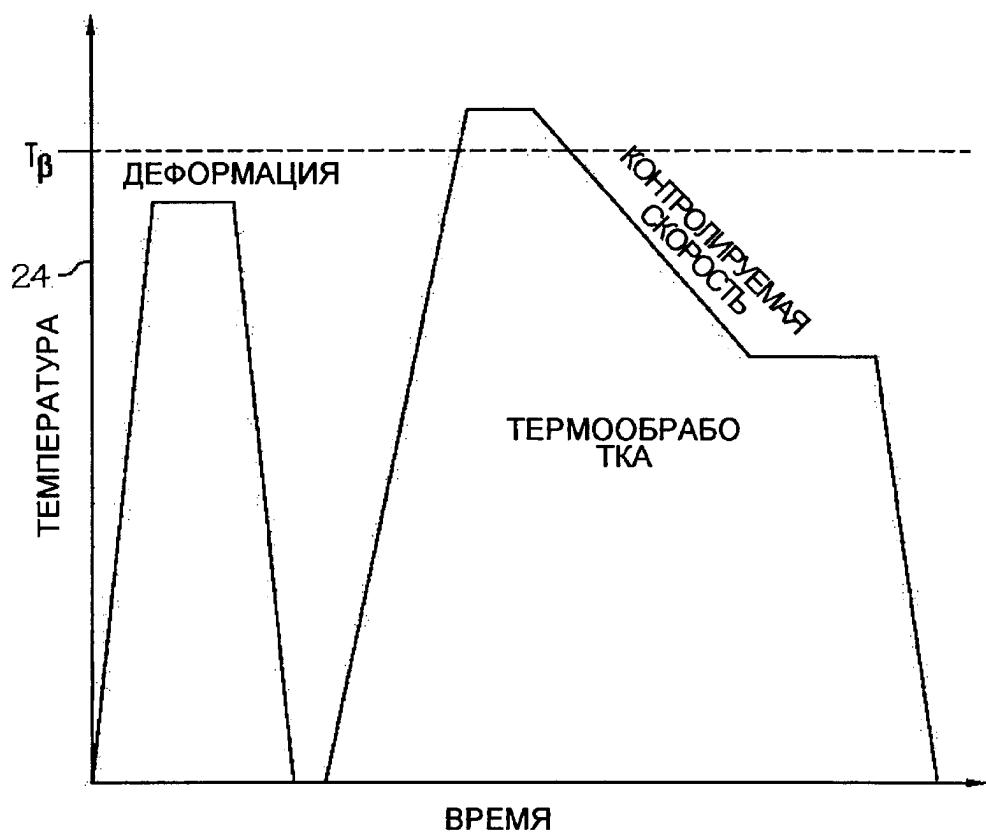
Фиг. 1А



Фиг. 1Б

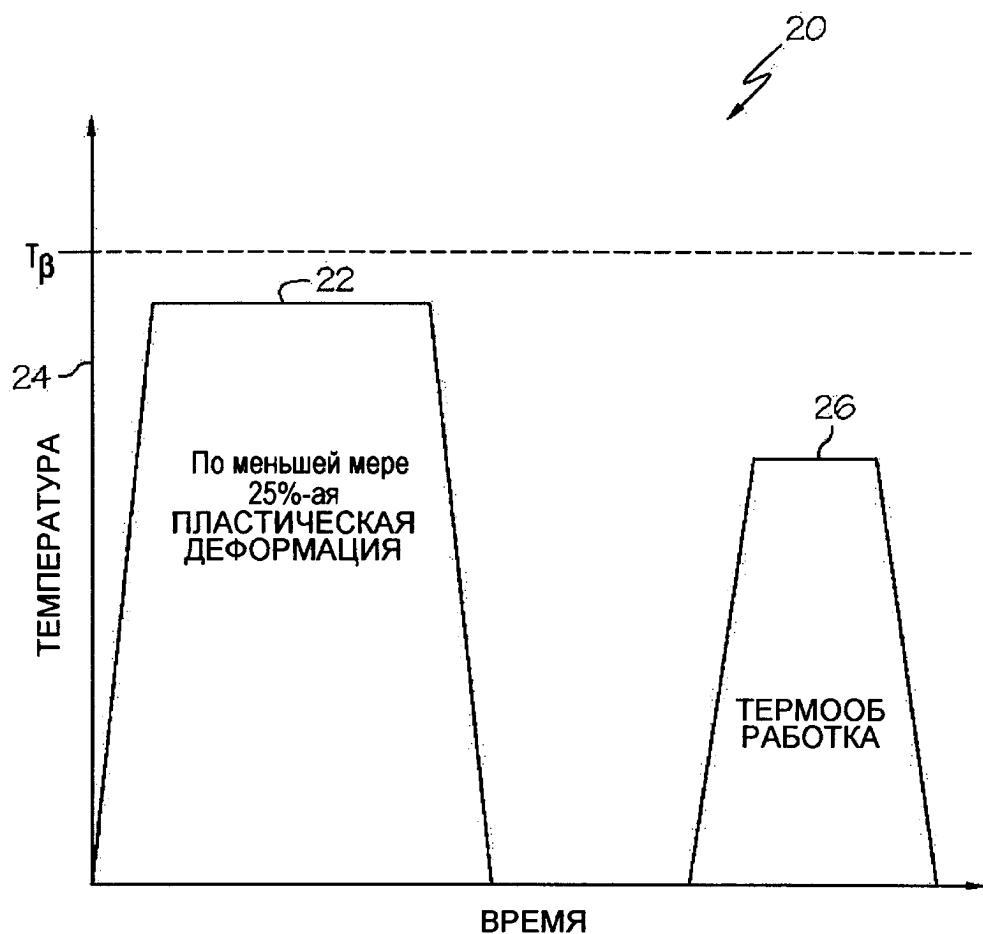


Фиг. 1С

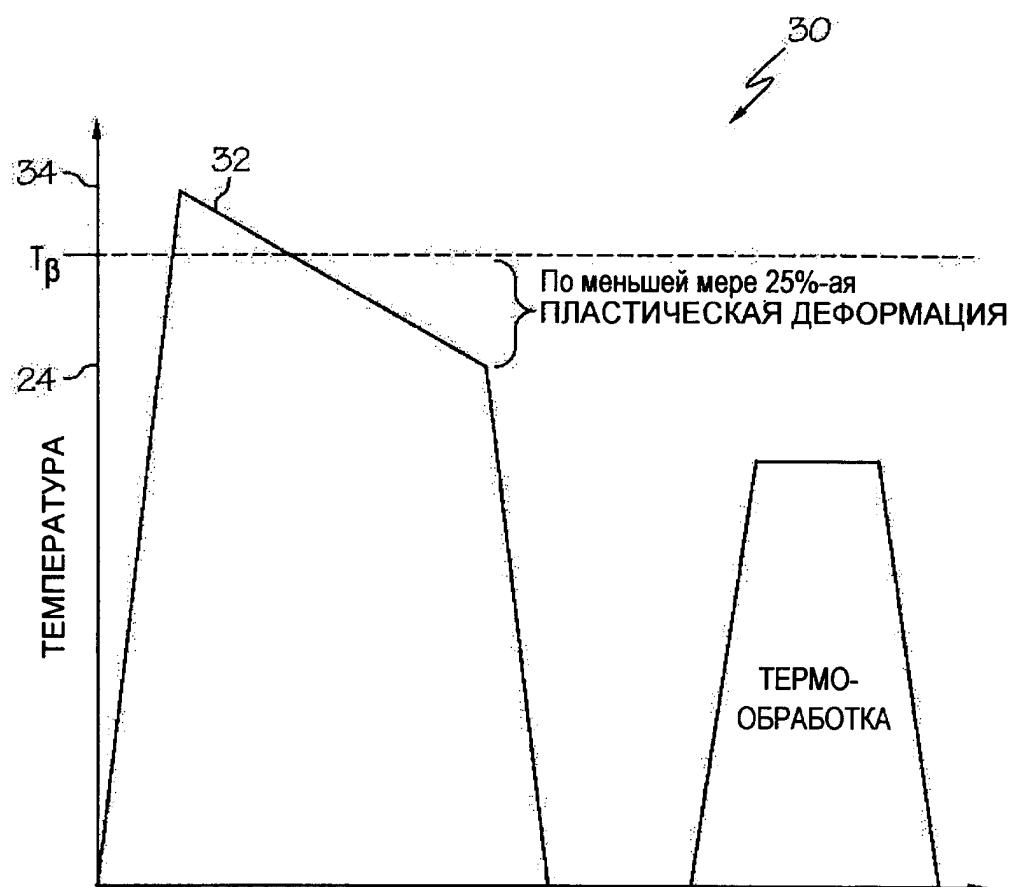


(Уровень техники)

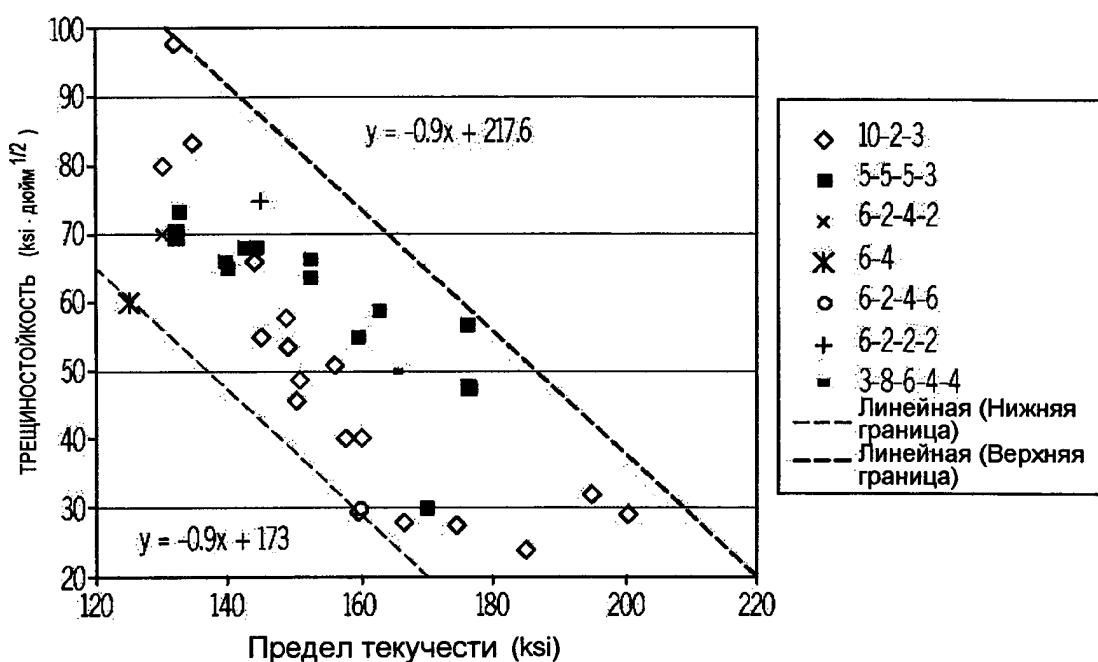
Фиг. 2



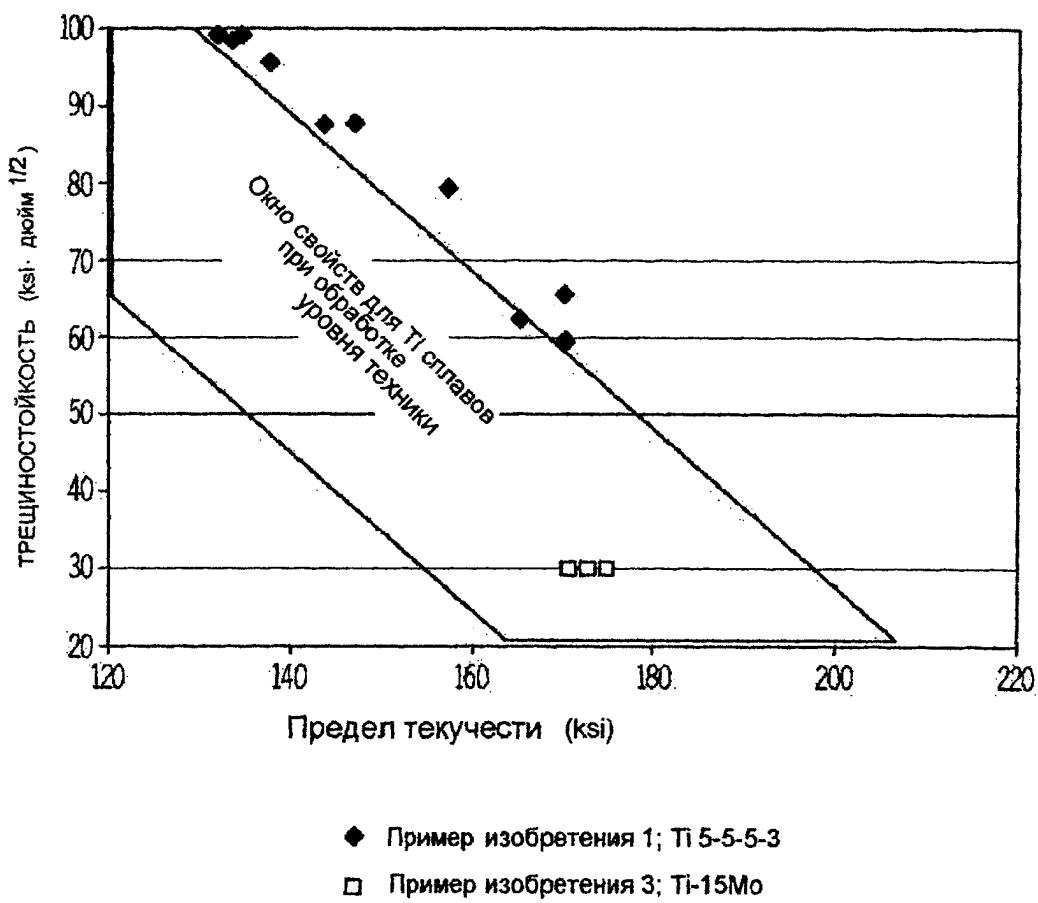
Фиг. 3



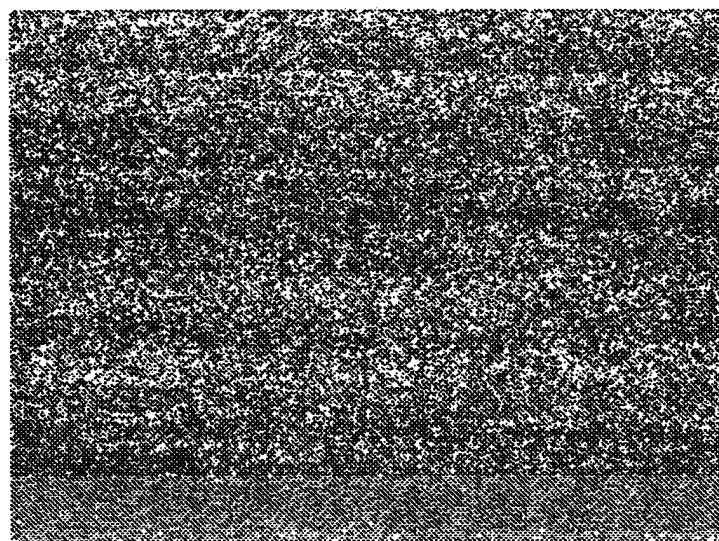
Фиг. 4



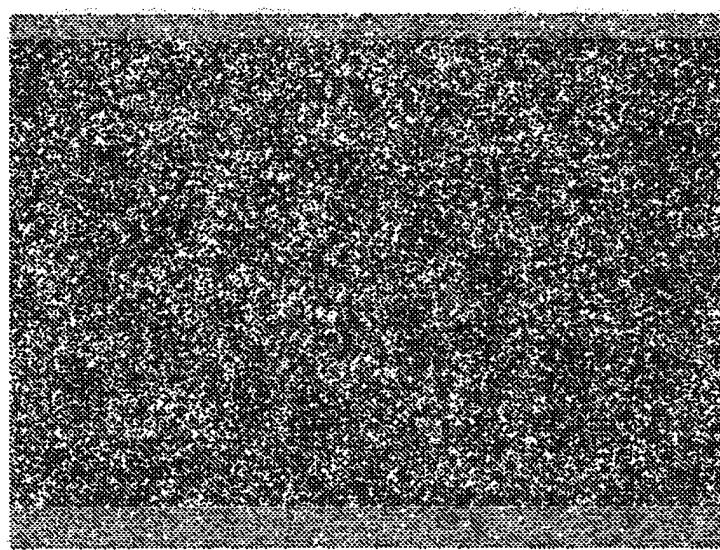
Фиг. 5



Фиг. 6



Фиг. 7А



Фиг. 7В