

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **042379**

(13) **B1**

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ

(45) Дата публикации и выдачи патента
2023.02.08

(21) Номер заявки
202090708

(22) Дата подачи заявки
2018.10.08

(51) Int. Cl. **C22C 14/00** (2006.01)
C22F 1/18 (2006.01)
F16B 31/00 (2006.01)
F16B 33/00 (2006.01)
B33Y 70/00 (2015.01)

**(54) МЕТАСТАБИЛЬНЫЙ β -ТИТАНОВЫЙ СПЛАВ И СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
ТИТАНОВЫХ КРЕПЕЖНЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ЭТОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА**

(31) 2017904043

(32) 2017.10.06

(33) AU

(43) 2020.06.29

(86) PCT/AU2018/051082

(87) WO 2019/068148 2019.04.11

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:
МОНАШ ЮНИВЕРСИТИ (AU)

(72) Изобретатель:
У Синьхуа, Чжоу Сигэнь (AU)

(74) Представитель:
**Поликарпов А.В., Соколова М.В.,
Черкас Д.А., Игнатьев А.В., Путинцев
А.И., Билык А.В., Дмитриев А.В. (RU)**

(56) US-A-5068003

US-A1-20030168138

WO-A1-2016114956

COTTON J. D. et al.: "State of the Art in
Beta Titanium Alloys for Airframe Applications" The
Minerals Metals & Materials Society, 2015, vol. 67, №
6, pages 1281-1303

RMI Titanium Company, "Titanium Alloy"
RTI International Metals, Inc. Company, 2000, pages
1-45.

(57) Предложен метастабильный β -титановый сплав, содержащий от 7,5 до 8,5 мас.% ванадия, от 5,5 до 6,5 мас.% хрома, от 3,5 до 4,5 мас.% молибдена, от 3,5 до 4,5 мас.% циркония, от 3 до 4 мас.% алюминия, до 0,30 мас.% кислорода, не более 0,3 мас.% железа, до 0,03 мас.% азота, до 0,03 мас.% водорода, не более 50 ч/млн иттрия, не более 0,15 мас.% каждого из других элементов, кроме углерода и титана, и 0,40 мас.% в их совокупности, остальное, кроме углерода и титана; причем указанный сплав содержит углерод, присутствующий при стабильном общем содержании углерода, превышающем 0,05 мас.%, и при максимальном содержании углерода, не превышающем 0,20 мас.% и регулируемым таким образом, чтобы исключить образование карбидов. Также предложен способ изготовления титановых крепежных изделий из этого титанового сплава, где указанный сплав подвергают гомогенизирующей термообработке, а затем изготавливают крепежное изделие требуемой формы.

B1

042379

042379

B1

Область техники

Настоящее изобретение относится к составу титанового сплава, который является термической обрабатываемым для получения улучшенных физических свойств, а именно, уровней предела прочности на растяжение (UTS) и, где это необходимо, сопротивления двойному сдвигу (DSS) и усталостной прочности резьбового участка.

Уровень техники

В настоящее время ряд компонентов из титанового сплава изготавливают из Ti-6Al-4V (Ti-64), альфа/бета титанового сплава. В основном это относится к крепежным изделиям из титанового сплава, в частности, для применения в аэрокосмической отрасли. Крепежные изделия из сплава Ti-64 имеют ограничение по величине диаметра менее 19,05 мм (0,75 дюйма), а значения механических свойств в этом диапазоне диаметров составляют UTS 1100 МПа, DSS 655 МПа и усталостная прочность резьбового участка 440 МПа при максимальном числе циклов, которое достигает 130000.

Другие типы высокопрочных титановых крепежных изделий изготавливают из соответствующих бета-титановых сплавов. Первым из них является сплав Бета-С, который соответствует химическому составу Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr и имеет UTS 1240 МПа, DSS 740 МПа и усталостную прочность резьбового участка 471 МПа при заданных условиях испытаний. Диаметр болтов из сплава Бета-С ограничен величиной в 25,4 мм (один дюйм). Второй бета-титановый сплав соответствует химическому составу Ti-5Al5Mo-5V-3Cr-0,5Fe (Ti-5553), который, как сообщалось, имеет UTS 1309 МПа и DSS 779 МПа с относительным удлинением при растяжении около 10%. Однако применение крепежных изделий из сплавов обоих типов является ограниченным из-за тенденции к межзёренному усталостному разрушению в резьбовом участке крепежных изделий, которое обусловлено зернограничной альфа-фазой.

Бета-титановые сплавы были предложены в качестве потенциальных кандидатов для достижения более высокой прочности, сравнимой со сплавами на основе стали и никеля. Они обычно содержат микроструктуру из небольших гексагональных плотноупакованных (HCP) альфа-фаз в объемноцентрированных кубических (ОЦК) бетафазах, и основной упрочняющий эффект в указанных сплавах обусловлен выделениями альфа-фазы. Однако в бета-титановых сплавах непрерывные зернограничные альфа-фазы, неравномерное альфа-выделение и относительно большие размеры бета-зерен обуславливают проблемы, препятствующие усовершенствованию механических свойств бета-титановых сплавов. В частности, если достигается состояние высокой прочности, то пластичность и усталостные свойства указанных сплавов обычно имеют тенденцию к снижению.

В ранней работе, подробно описанной в приведенных ниже ссылках [1]-[5], было обнаружено, что незначительная добавка углерода к бета-титановым сплавам может устранить зернограничные альфа-фазы, ускорить и уменьшить размер альфа-выделений и уменьшить размер бета-зерен. Было обнаружено, что эти изменения приводят к значительному повышению пластичности и усталостных свойств указанных сплавов без потери высоких уровней прочности. Изученные бета-титановые сплавы включают жаропрочный титановый сплав Ti-35V-15Cr-0,3Si-0,1C, сплав Ti-15-3-3 (сокращенное обозначение для Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn) и сплав Ti-13Cr. Однако эта работа не распространялась на титановый сплав Бета-С, в отношении которого настоящее изобретение стремится усовершенствованный термически обрабатываемый состав, позволяющий достичь улучшенных физических свойств, в частности, повышенных уровней UTS и, где необходимо, DSS и усталостную прочность в резьбовых участках.

Сущность изобретения

Настоящее изобретение относится к метастабильному β-титановому сплаву, который обычно соответствует диапазону состава стандартного титанового сплава Бета-С, кроме содержания углерода, и для простоты описания метастабильный β-сплав по настоящему изобретению в данном документе обозначен как "модифицированный сплав". С момента своего создания около 50 лет назад компанией RMI Titanium Company стандартный Бета-С нашел важное применение там, где требуется очень высокая прочность, например, для крепежных изделий и компонентов посадочного оборудования для летательных аппаратов.

Как и в случае стандартного титанового сплава Бета-С модифицированный сплав по настоящему изобретению содержит от 7,5 до 8,5 мас.% ванадия, от 5,5 до 6,5 мас.% хрома, от 3,5 до 4,5 мас.% молибдена, от 3,5 до 4,5 мас.% циркония, от 3 до 4 мас.% алюминия, до 0,30 мас.% кислорода, не более 0,3 мас.% железа, до 0,03 мас.% азота, до 0,03 мас.% водорода, не более 50 ч/млн иттрия, не более 0,15 мас.% каждого из других элементов (кроме углерода и титана) и 0,40 мас.% в их совокупности с избытком от 0,05 до 0,1 мас.%, остальное (кроме углерода) - титан. В стандартном титановом сплаве Бета-С содержание углерода не должно превышать 0,05 мас.%, что обычно означает менее 0,05 мас.% углерода и, как правило, менее 0,02 мас.% углерода. В действительности нет никаких минимальных требований к содержанию углерода в сплаве Бета-С, а это означает, что на самом деле углерод присутствует только в качестве нежелательной неизбежной примеси. В модифицированном сплаве по настоящему изобретению содержание углерода должно быть на стабильном уровне, превышающем 0,05 мас.%. Также в отличие от этого настоящее изобретение допускает или обычно требует преднамеренного добавления углерода сверх исключения "менее чем 0,05 мас.% углерода", применительно к "общему содержанию углерода", в

отношении настоящего изобретения, что означает комбинированную величину из такого остаточного содержания углерода плюс добавленный углерод. При этом максимальное содержание углерода не превышает 0,20 мас. %.

В модифицированном сплаве по настоящему изобретению общее содержание углерода должно быть в достаточной степени выше 0,05 мас. % для достижения требуемого усовершенствования механических свойств, а именно UTS, DSS и усталостной прочности или предела резьбового участка. Однако максимальное общее содержание углерода необходимо регулировать, чтобы исключить образование карбидов, оказывающих вредное влияние на уровень усталостной прочности. С практической точки зрения требование к содержанию углерода, не превышающему 0,05 мас. %, в стандартном титановом сплаве Beta-C, не допускает возможность добавления углерода, за исключением случайного присутствия в компонентах, из которых изготовлен указанный стандартный сплав. Напротив, модифицированный сплав по настоящему изобретению обычно требует преднамеренного добавления углерода, в частности, если модифицированный сплав должен быть получен из некоторого количества расплавленного стандартного сплава Beta-C. Как указано, общий углерод должен быть на уровне, превышающем 0,05 мас. %, хотя допустимый уровень установлен так, чтобы общий углерод не превышал максимум, при котором могут образовываться карбиды, оказывающие вредное влияние.

В процессе поиска стабильного общего содержания углерода, которое обеспечивает требуемое усовершенствование таких механических свойств, как UTS, DSS и усталостная прочность в резьбовых участках, избегая образования карбидов, оказывающих вредное влияние на уровень усталостной прочности, было установлено, что допустимый верхний предел для общего углерода может изменяться в зависимости от конкретного общего состава сплава между нижним и верхним пределами диапазонов для ванадия, хрома, молибдена, циркония, алюминия и, следовательно, титана, указанных для сплава по настоящему изобретению. Кроме этого требуемые механические свойства, то есть UTS, DSS и усталостная прочность в резьбовых участках, достигаются соответствующим режимом термообработки. Кроме того, склонность данного сплава в пределах указанных границ этих диапазонов приспособляться к данному верхнему пределу общего углерода изменяется от одного состава к другому. Эта склонность изменяется не только в зависимости от состава сплава, но также в зависимости от конкретной термической обработки и, в частности, от изменения скорости охлаждения от достаточно высокой температуры. Принимая во внимание эти факторы, было обнаружено, что углерод может быть добавлен до стабильного общего содержания углерода 0,20 мас. %. Содержание углерода, превышающее 0,25 мас. %, имеет тенденцию приводить к образованию карбидов при любом режиме охлаждения после термической обработки для всех составов по меньшей мере в случае дисперсионного твердения β -фазы, вызываемого нагреванием, обеспечивающего обработку раствора выше соответствующей температуры бета-превращения для каждого сплава. Таким образом, как правило, необходимо не превышать 0,25 мас. % общего углерода в целом, чтобы соответствовать небольшому окну для добавления углерода и ограничивать образование карбидов, оказывающих вредное влияние на уровень усталостной прочности.

Как указано, обычно требуется, чтобы общее содержание углерода не превышало 0,25 мас. %, чтобы избежать образования карбидов по меньшей мере до степени, оказывающей вредное воздействие на уровень усталостной прочности сплава. Однако общее содержание углерода не превышает 0,2 мас. % в целом для всех составов сплава в пределах нижней и верхней границ диапазонов для ванадия, хрома, молибдена, циркония, алюминия и, следовательно, титана, указанных для сплава по настоящему изобретению. Общее содержание углерода также должно быть достаточно выше 0,05 мас. % для достижения требуемого усовершенствования механических свойств, то есть UTS, DSS и усталостной прочности в резьбовых участках. Уровень общего содержания углерода выше 0,05 мас. % изменяется в зависимости от состава сплава, и, чтобы этого было достаточно, общее содержание углерода обычно должно составлять от 0,065 до 0,20 мас. % и предпочтительно от 0,70 до 0,20 мас. %. Более предпочтительно общее содержание углерода для всех сплавов по настоящему изобретению составляет от 0,70 до 0,15 мас. %, например от 0,07 до 0,010 мас. %, и наиболее предпочтительно 0,08 мас. %. Возможное стабильное содержание углерода в модифицированном сплаве по настоящему изобретению может быть рассчитано путем фактического экспериментального измерения объемной доли карбидных фаз, если таковые имеются, в процентном содержании обнаруженного углерода. В сочетании с микроскопическим анализом, который обеспечивает точные кристаллографические данные и расчетную фазовую диаграмму, можно определить стабильное содержание углерода для каждого состава сплава. Обозначение углерода как "стабильный углерод" указывает на то, что углерод остается в твердом растворе в преобладающей бета-фазе сплава после охлаждения от режима термической обработки раствора при повышенной температуре, в отличие от углерода, который в виде карбида выделяется в бета-фазе вследствие такого охлаждения.

Краткое описание чертежей

Далее будет уместно описать настоящее изобретение со ссылкой на прилагаемые фигуры, иллюстрирующие вариант осуществления титанового сплава по настоящему изобретению. Возможны другие варианты осуществления изобретения и, следовательно, особенности этих чертежей следует понимать как не заменяющие собой применимость общего описания настоящего изобретения, представленного в этом общем описании и определенного прилагаемой формулой изобретения.

На фиг. 1 представлены микрофотографии, показывающие микроструктуру (а) титанового сплава по настоящему изобретению по сравнению с микроструктурой (b) стандартного сплава Beta-C, в каждом случае после того, как соответствующий сплав подвергли гомогенизирующей термической обработке;

на фиг. 2 представлены микрофотографии, показывающие зернограничную альфа-фазу (а) титанового сплава по фиг. 1 по сравнению с (b) стандартным сплавом Beta-C.

При использовании, например, для изготовления титановых крепежных изделий сплав по настоящему изобретению обычно подвергают ряду технологических операций, в которых его обрабатывают или подвергают деформации, таких как, но не ограниченных ими, по меньшей мере одному технологическому этапуковки, прокатки или выдавливания. После этого сплав обычно подвергают гомогенизирующей термообработке перед приданием ему требуемой формы, например методом волочения. Сплав согласно настоящему изобретению и два стандартных титановых сплава Beta-C обрабатывали аналогичным образом. В табл. 1 представлены составы указанных сплавов и показано, что общее содержание углерода в выбранном сплаве по настоящему изобретению составляло 0,101 мас.%, тогда как два стандартных сплава Beta-C имели остаточные содержания углерода 0,023 и 0,014 мас.% соответственно.

Для сплавов, указанных в табл. 1, на фиг. 1 показана микроструктура (а), полученная с использованием сплава по настоящему изобретению, и микроструктура (b) первого сплава Beta-C, в каждом случае после того, как сплав подвергли гомогенизирующей термической обработке. Сравнение указанных микроструктур показывает, что размер бета-зерен заметно меньше, как показано на фиг. 1 - на порядок по величине, в сплаве по настоящему изобретению, чем в стандартном сплаве Beta-C.

Расчеты, основанные на определении в двух и трех измерениях объемных долей Ti_2C в сплаве по настоящему изобретению, показали, что несмотря на высокое содержание углерода по сравнению со сплавом Beta-C сплав по настоящему изобретению все еще имел приблизительно 0,0935 мас.% углерода в твердом растворе.

Таблица 1

Первый Beta-C, пруток 20 мм	0,119	0,01	0,0042	0,023	3,56	8,09	6,09	4,01	4,15	0,081	0,037	Меньше 0,0005	Остаточное
Второй Beta-C, пруток 17,5 мм, холодная штамповка	0,082	0,021	0,0072	0,014	3,363	7,81	5,66	3,88	4,03	0,069	0,028	Меньше 0,0005	Остаточное
По настоящему изобретению, пруток 20 мм, холодное волочение	0,202	0,019	0,0043	0,101	3,39	7,77	6,05	3,93	3,88	0,053	0,035	Меньше 0,0005	Остаточное
Элемент	O	N	H	C	Al	v	Cr	Mo	Zr	Fe	Si	Y	Ti

На фиг. 2 при более высоком увеличении представлено сравнение влияния углерода для сплава по настоящему изобретению из табл. 1, показанного на (а), и для второго сплава Beta-C из табл. 1, показанного на (b). Сплав Beta-C явно демонстрирует зернограничную α -фазу, тогда как в модифицированном сплаве по настоящему изобретению α -фаза весьма мало заметна.

Титановые прутки из сплавов по табл. 1 подвергали теплomu или холодному волочению до диаметра, близкого к требуемому размеру крепежного изделия, с последующей соответствующей обработкой поверхности, такой как правка, механическая зачистка, механическая обработка и очистка поверхности. Затем тянутые прутки подвергали оптимизированной последующей термообработке, как подробно описано ниже, получая оптимальные механические свойства. Было обнаружено, что углерод, добавленный в сплав по настоящему изобретению, усовершенствует восприимчивость к старению и прокаливаемость, по существу, благодаря дисперсионному твердению β -фазы за счет ускоренного выделения α -фазы. По-видимому, более высокое содержание углерода в сплаве по настоящему изобретению может способствовать ускоренному выделению α -фазы за счет снижения скорости охлаждения, необходимой для выделения при охлаждении от температуры β -превращения, вследствие того, что кривые ТТТ (кривые время-температура-превращение) немного смещаются в направлении повышенного содержания углерода.

В целом, на сплавах по настоящему изобретению обнаружено, что после старения альфа-выделения

были гомогенными и мелкими в матрице бета-фазы, в то время как зернограничная альфа-фаза, которая обычно существует в титановых сплавах, по существу была устранена. Также было обнаружено, что при уровнях, требуемых настоящим изобретением, углерод повышает стойкость указанных сплавов к кислороду. Для стандартных аэрокосмических титановых сплавов верхний предел содержания кислорода составляет 2000 ч/млн, но с добавленным углеродом на уровнях общего углерода, допускаемых настоящим изобретением, сплав по настоящему изобретению может содержать до 3000 ч/млн кислорода без снижения.

Оптимальным режимом последующей термической обработки является прямое старение при температуре печи от 440 до 540°C в течение периода времени от 1 до 12 ч. Углерод считают стабилизатором альфа-фазы в титановых сплавах, но обычно при значительно более высокой концентрации, чем допускает настоящее изобретение. Предполагают, что при уровне общего углерода, необходимом для настоящего изобретения, термическая обработка приводит в действие механизм, посредством которого добавленный углерод служит предшественником альфа-выделения на атомном уровне. Это аналогично роли углерода в качестве стабилизатора альфа-фазы. Как указано, добавленный углерод по настоящему изобретению уменьшает зернограничную альфа-фазу, во-первых, потому, что выделившиеся в бета-фазе альфа-частицы являются небольшими по размеру и однородными. Во-вторых, в то время как кислород имеет большое сродство к альфа-фазе в титановых сплавах в целом, мелкая и однородная альфа-фаза, которая выделяется в бета-фазе в сплаве по настоящему изобретению, образуется при помощи углерода, привлекая кислород, который имеет тенденцию сегрегировать по границам зерен и достаточно мал, чтобы диффундировать, и диффундирует в мелкую и равномерно распределенную альфа-фазу. Исключение сегрегации кислорода по границам зерен приводит к устранению движущей силы для зернограничной альфа-фазы, как видно из фиг. 2, и является ключом к значительному повышению усталостной прочности в резьбовых участках.

Типичные свойства при растяжении и сдвиге, приведенные в табл. 1, получены на тянутом прутке конечным диаметром 20 мм и характеризуются пределом прочности на растяжение в 1518 МПа, относительным удлинением в 9% и сопротивлением двойному сдвигу в 829 МПа. Тянутый пруток диаметром 10 мм показывает предел прочности на растяжение около 1500 МПа, относительное удлинение 12% и сопротивление двойному сдвигу 824 МПа. Усталостные свойства материала с надрезом или резьбой, полученного из сплавов, подвергнутых последующей обработке, представлены в табл. 2 для первого сплава Beta-C из табл. 1 и для сплава Ti64, состав которого показан в табл. 3. В каждом случае испытания проводили на образцах диаметром 10 мм с накатанной на них резьбой как и в стандартных титановых крепежных изделиях. Требование, установленное в стандарте на крепежные изделия аэрокосмического применения, составляет 65000 циклов при напряжении 38% UTS материала. Поверхности усталостного излома стандартного сплава Beta-C обычно содержат значительное количество межзёренного разрушения, которое приводит к непредсказуемости и возможному значительному изменению усталостной долговечности. В противоположность этому, в поверхности усталостного излома сплава по настоящему изобретению преобладает вязкое разрушение с незначительным межзёренным разрушением, что указывает на стабильную и надежную усталостную характеристику материала с узкой полосой разброса механических свойств.

Таблица 2. Сравнение усталостной долговечности резьбового участка типичных титановых крепежных изделий диаметром M10

	Максимальное напряжение (МПа)	Коэффициент R	Долговечность (число циклов)
Beta-C с углеродом	521	0,1	760000
Стандартный Beta-C	471	0,1	Испытания прерваны при 130000
Ti64	440	0,1	130000

Таблица 3. Состав сплава Ti-4V-6Al

Элемент	Минимум	Максимум
Алюминий	5,50	6,75
Ванадий	3,50	4,50
Железо	-	0,30
Кислород	-	0,20
Углерод	-	0,08
Азот	-	0,05 (500 ч/млн)
Водород (3.1.3); (3.1.1)	-	0,0125 (125 ч/млн)
Иттрий (3.1.2)	-	0,005 (50 ч/млн)
Каждый из других элементов (3.1.2)	-	0,10
Другие элементы в сумме (3.1.2)	-	0,40
Титан	остальное	

Из вышеприведенного описания понятно, что уровень общего углерода, требуемый в сплаве по настоящему изобретению, ускоряет и измельчает выделения афазы, и в то же время, по существу, избегая зернограничной α -фазы. Соответствующим образом термически обработанные крепежные изделия, изготовленные из сплава по настоящему изобретению, проявляют улучшенные свойства при растяжении, двойном сдвиге и усталостные свойства по сравнению с существующими крепежными изделиями из сплава Ti64, а также стандартными крепежными изделиями из сплава Beta-C. Чтобы проиллюстрировать это, сообщается, что самолет Боинг 787 собран с использованием 2,4 млн крепежных изделий, причем 22% из них - это строительные болты, в основном из титана, предположительно Ti64, а остальные - заклепки. Предполагается, что замена существующих крепежных изделий Ti64 крепежными изделиями из сплава по настоящему изобретению обеспечит снижение веса по меньшей мере на 20%, что означает уменьшение массы приблизительно на 6000-7500 кг.

Сплав по настоящему изобретению также можно распылять, получая порошок для использования в 3D-печати или обрабатывать с помощью обычнойковки и литья. Описанный выше механизм, лежащий в основе усовершенствования широкого диапазона механических свойств этого сплава, будет сохранен во всех этих формах материала.

Список литературы

1. Z.Q. Chen, D. Hu, M.H. Loretto и Xinhua Wu, «Влияние добавок углерода на микроструктуру и механические свойства Ti-15-3» («Effect of carbon additions on microstructure and mechanical properties of Ti-15-3»), *J. Mat. Sci & Tech.* том 20, 2004, страницы 343-349.
2. Z.Q. Chen, D. Hu, M.H. Loretto и Xinhua Wu, «Влияние 0,2 масс.% углерода на восприимчивость к старению Ti-15-3» («Influence of 0.2wt-%C on the aging response of Ti15-3»), *J. Mat. Sci & Tech.* том 20, 2004, страницы 756-764.
3. M.Chu, Xinhua Wu, I.P. Jones и M.H. Loretto, «Влияние углерода на восприимчивость к старению и характеристики растяжения эвтектоидного бета-титанового сплава Ti-13Cr» («Influence of carbon on aging response and tensile properties of eutectoid beta titanium alloy Ti-13Cr»), *J. Mat. Sci. & Tech.* том 22, № 6, 2006, страницы 661666.
4. M.Chu, Xinhua Wu, I.P. Jones, M H Loretto, «Влияние углерода на микроструктуру и механические свойства эвтектоидного бета-титанового сплава» («Effect of Carbon on Microstructure and Mechanical Properties of a Eutectoid Beta Titanium Alloy»), *Rare Metal Materials and Engineering* том 35, дополнение 1, февраль 2006, страницы 220224.
5. D Hu, AJ Huang, XP Song и Xinhua Wu, «Выделение в легированном углеродом Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al» («Precipitation in carbon-doped Ti-15V- 3Cr-3Sn-3Al»), *Rare Metal Materials and Engineering* том 35, дополнение 1, февраль 2006, страницы 225-229.
6. Xinhua Wu, J. del Prado, Q. Li, A. Huang, D. Hu и M. H. Loretto, "Аналитическая электронная микроскопия безуглеродистого и углеродсодержащего Ti-15-3" («Analytical Electron Microscopy of C-free and C-containing Ti-15-3»), *Acta Materialia*. том 54, выпуск 20, 2006, страницы 5433-5448.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Метастабильный β -титановый сплав, содержащий от 7,5 до 8,5 мас.% ванадия, от 5,5 до 6,5 мас.% хрома, от 3,5 до 4,5 мас.% молибдена, от 3,5 до 4,5 мас.% циркония, от 3 до 4 мас.% алюминия, до 0,30 мас.% кислорода, не более 0,3 мас.% железа, до 0,03 мас.% азота, до 0,03 мас.% водорода, не более 50 ч/млн иттрия, не более 0,15 мас.% каждого из других элементов, кроме углерода и титана; причем указанный сплав содержит углерод, присутствующий при стабильном общем содержании углерода, превышающем 0,05 мас.%, и при максимальном содержании углерода, не превышающем 0,20 мас.% и регулируемым таким образом, чтобы исключить образование карбидов.

2. Титановый сплав по п.1, в котором общий углерод присутствует в стабильном содержании от 0,065 до 0,20 мас.%.

3. Титановый сплав по п.1, в котором общий углерод присутствует в стабильном содержании от 0,070 до 0,2 мас.%.

4. Титановый сплав по п.1, в котором общий углерод присутствует в стабильном содержании от 0,070 до 0,15 мас.%.

5. Титановый сплав по п.1, в котором общий углерод присутствует в стабильном содержании от 0,070 до 0,101 мас.%.

6. Титановый сплав по п.1, в котором общий углерод присутствует в стабильном содержании 0,080 мас.%.

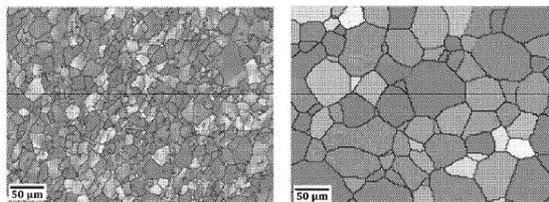
7. Титановый сплав по любому из пп.1-6, в котором общий углерод сохраняется в твердом растворе в преобладающей бета-фазе сплава после охлаждения от режима термической обработки раствора при повышенной температуре, но не в виде выделений карбида в бета-фазе как следствие такого охлаждения.

8. Способ изготовления титановых крепежных изделий из титанового сплава по любому из пп.1-7, где указанный сплав подвергают гомогенизирующей термообработке, а затем изготавливают крепежное изделие требуемой формы.

9. Способ по п.8, в котором изготовление крепежного изделия требуемой формы осуществляют посредством волочения.

10. Способ по п.8 или 9, в котором крепежные изделия подвергают последующей термообработке путем прямого старения при температуре печи от 440 до 540°C в течение периода времени в диапазоне от 1 до 12 ч.

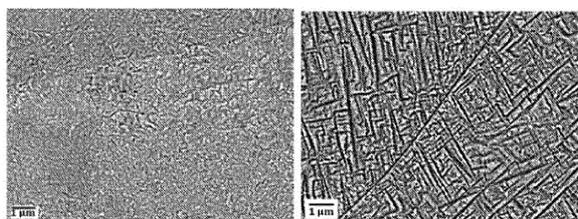
Сравнение размера зерен бета-фазы для сплава по настоящему изобретению и стандартного сплава Бета-С



(a) Сплав по настоящему изобретению (b) Стандартный сплав Бета-С

Фиг. 1

Сравнение границ альфа-зерен для сплава по настоящему изобретению и стандартного сплава Бета-С



(a) Сплав по настоящему изобретению (b) Стандартный сплав Бета-С

Фиг. 2

