

УДК 669.295

DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-4-23-30

А.А. Ширяев¹, В.Г. Анташев¹

ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ ВЫСОКОПРОЧНОГО САМОЗАКАЛИВАЮЩЕГОСЯ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНОГО ПСЕВДО- β -ТИТАНОВОГО СПЛАВА

Показаны роль и место псевдо- β -сплавов в развитии современных конструкционных титановых сплавов, проведен анализ комплекса их физико-механических и технологических характеристик. Показана перспектива разработки новых усовершенствованных сплавов данного класса. Определены возможности оптимального легирования. Выбрана матрица химического состава для создания нового высокопрочного самозакаливающегося высокотехнологичного псевдо- β -титанового сплава.

Ключевые слова: псевдо- β -титановые сплавы, высокопрочные титановые сплавы, технологичность, химический состав, свойства.

The role and place of pseudo- β -alloys in development of modern structural titanium alloys have been shown; a complex of physical- mechanical and technological characteristics of pseudo- β -alloys has been analyzed. The prospects of new advanced alloys development have been revealed for the present type of alloys. Optimal alloying limits have also been determined. A matrix of chemical composition has been chosen for the new high-strength and high-processable self-hardening pseudo- β -titanium alloy development.

Keywords: pseudo- β -titanium alloys, high-strength titanium alloys, workability, chemical composition, properties.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

Введение

В настоящее время увеличение доли титановых материалов в конструкции планера современных самолетов происходит достаточно быстро [1]. Одновременно с этим в условиях жесткой конкуренции первостепенными становятся требования к экономичности изделий при их производстве и эксплуатации [2, 3]. В этой ситуации особое значение приобретают вопросы, связанные с повышением технологичности процессов изготовления титановых сплавов для узлов и деталей при одновременном улучшении ресурсных характеристик изделий. Для решения этой сложной комплексной задачи наиболее перспективными являются титановые сплавы, которые обладают необходимым уровнем технологической пластичности в отожженном или закаленном состоянии, но при этом термически упрочняемы, что позволит обеспечить высокий уровень эксплуатационных свойств деталей и весовую отдачу. Последняя величина – важнейшая характеристика для авиационной промышленности.

Материалы и методы

Среди существующих российских титановых сплавов, применяемых при изготовлении деталей планера для современных военных и гражданских самолетов (Ил-96-300, Ил-114, Ту-204), наиболее широко используются лишь низко- и среднепроч-

ные сплавы (листовые полуфабрикаты): ОТ4-1, ВТ20, ВТ6, ВТ14. Предел прочности вышеперечисленных сплавов не превышает 1050 МПа (ВТ14), а уровнем технологичности, необходимым для холодной листовой штамповки, обладает лишь сплав ОТ4-1 (при прочности ~ 740 МПа). Современные высокопрочные ($\alpha+\beta$)-сплавы не обладают технологичностью, необходимой для эффективного производства сложнопрофильных изделий из листовых полуфабрикатов. Высоколегированные титановые сплавы на основе β -фазы (ВТ35 и ВТ32), обладающие высоким комплексом механических свойств ($\sigma_b \approx 850-950$ МПа – в закаленном состоянии, от 1150 МПа и более – в состоянии после упрочняющей термической обработки), не внедрены в авиационную промышленность, что обусловлено многими технико-экономическими факторами: более высокими требованиями к организации производственных процессов для получения высококачественных промышленных слитков, стоимостью шихтового набора и рядом других причин.

Среди зарубежных титановых сплавов для производства конструкций планера самолета (в том числе и листовых) используются такие сплавы, как Ti-6-4, β -21S и Ti-10-2-3 (Boeing 777). Уровень прочностных свойств подобных сплавов составляет: $\sigma_b \approx 1100-1150$ МПа, однако они не обладают достаточной технологической пластичностью при комнатной температуре и эффектом са-

мозакаливания в вакуумных или аргоно-вакуумных печах.

Таким образом, разработка нового высокопрочного и высокотехнологичного титанового сплава, обладающего эффектом самозакаливания и улучшенным комплексом технологических и эксплуатационных характеристик, является актуальной научной задачей, решение которой позволит обеспечить авиационную промышленность высокопрочными сложнопрофильными листовыми конструкциями, необходимыми для производства деталей планера, обшивок крыла, стабилизаторов, закрылков и других элементов конструкций летательных аппаратов. Это позволит повысить ресурс, степень надежности и уровень экономичности перспективных изделий авиационного транспорта.

Говоря о возможности выбора химического состава титановых сплавов, предназначенных для изготовления сложнопрофильных изделий из тонколистовых полуфабрикатов путем холодной штамповки, нельзя не затронуть тему общей классификации титановых сплавов. В основе данной классификации лежат принципы разделения титановых сплавов в зависимости от структуры и особенностей метастабильных превращений в $(\alpha+\beta)$ -сплавах, зависящих от соотношения α - и β -составляющих в сплаве в стабильном состоянии (коэффициент стабилизации K_β). Структура конструкционных титановых сплавов в равновесном состоянии представлена α -, β - и $(\alpha+\beta)$ -фазами. В зависимости от соотношения α - и β -фаз титановые $(\alpha+\beta)$ -сплавы можно разделить на несколько групп, существенно отличающихся по физико-механическим и технологическим свойствам [4]. При этом можно выделить такие группы сплавов, как псевдо- α -сплавы ($K_\beta \leq 0,25$), сплавы мартенситного класса ($K_\beta = 0,3-0,8$), сплавы переходного класса ($K_\beta = 1,0-1,4$) и псевдо- β -сплавы (K_β изменяется от 1,4 до значений, присущих β -сплавам) [5]. К отдельной категории относятся медицинские титановые сплавы, имеющие, как правило, более стабильную β -структуру и легированные исключительно биосовместимыми легирующими элементами (K_β изменяется от 1,8 и более).

Таким образом, с учетом особенностей структуры и, следовательно, физико-механических и технологических свойств титановые сплавы можно разделить на следующие классы: α -сплавы, псевдо- α -сплавы, сплавы мартенситного типа, сплавы переходного типа, псевдо- β -сплавы и β -сплавы, в том числе для медицинских целей. Такая классификация охватывает все возможные структурные состояния титановых материалов. Номенклатура промышленных титановых сплавов соответствует этим типам структур.

Каждый класс включает в себя множество сплавов с различной степенью упрочнения α - и β -твердых растворов при легировании и соотношением конкретных легирующих элементов. При этом сплавы, сохраняя основные свойства, прису-

щие определенному классу (комплекс технологических и физико-механических характеристик), отличаются друг от друга, как правило, соотношением прочности, пластичности, технологичности, коррозионной стойкости, жаропрочности и других характеристик [6, 7]. В соответствии с данной закономерностью существует возможность предварительной оценки сплавов различных групп с позиции достижения требуемого уровня свойств и выбора целевой экспериментальной композиции.

Титановые малолегированные α -сплавы. К сплавам данной группы можно отнести технический титан различных марок (BT1-00, BT1-0, BT1-1, Grade 1 и др.) и такие малолегированные сплавы, как отечественные BT5, BT5-1 и их зарубежные аналоги (IMI 317). По химическому составу марки технического титана отличаются лишь различным содержанием примесей (кислорода, азота, углерода, железа, кремния и др.), при этом сплавы, содержащие меньшее количество примесей, отличаются меньшей прочностью и большей пластичностью. Технический титан обладает высокой технологической пластичностью и может подвергаться холодной деформации в значительных объемах, что позволяет изготавливать не только тонколистовой прокат, но и фольгу. Прочность технического титана не превышает 550 МПа. Сплав BT5 легирован только алюминием, а BT5-1 – алюминием и оловом, что позволяет повысить их прочность и жаропрочность, однако при этом снижается технологичность. Сплавы данной группы относятся к термически не упрочняемым сплавам и применяются после полного или неполного отжига. Предел прочности при разрыве этих материалов не превышает, как правило, 700–800 МПа.

Титановые псевдо- α -сплавы. Сплавы данной группы являются более легированными β -стабилизаторами, в их структуре может содержаться небольшое количество β -фазы. К ним можно отнести отечественные листовые сплавы: OT4, OT4-0, OT4-1, BT20, а также их зарубежные аналоги (Grade 9). Сплавы типа OT4 являются низколегируемыми сплавами, содержащими небольшое количество (0,2–5)% Al и (0,5–2)% Mn. Сплав OT4-1 является одним из наиболее технологичных титановых сплавов – хорошо деформируется в горячем и холодном состояниях и предназначен в основном для изготовления листов, лент и полос. Листовая штамповка деталей может проводиться как при комнатной температуре, так и с подогревом до 500°C. Сплав OT4 отличается несколько большим содержанием Al и обладает более высоким уровнем прочности (700–900 МПа), но запас его технологической пластичности в холодном состоянии заметно снижен, поэтому при листовой штамповке сложных по форме деталей требуется подогрев заготовок.

Сплав BT20 – сложнoleгированный сплав системы Ti–Al–Zr–Mo–V, благодаря высокому

содержанию Al (в сравнении с ОТ4) является более высокопрочным и жаропрочным сплавом, однако обладает более низкой технологической пластичностью – хорошо деформируется только в горячем состоянии, что накладывает серьезные ограничения на использование его с целью изготовления сложнопрофильных изделий из тонколистовых полуфабрикатов. Прочность данного сплава по причине малой степени гетерофазного упрочнения и невозможности применения упрочняющей термической обработки не превышает 1100 МПа.

К недостаткам вышеперечисленных сплавов можно отнести: невысокий уровень прочностных характеристик и очень большую склонность к водородной хрупкости (содержание водорода должно быть не более 0,005%) [1]. Для большинства α - и псевдо- α -сплавов наблюдается тенденция, которая заключается в том, что при увеличении степени твердорастворного упрочнения α -фазы посредством легирования α -стабилизаторами и нейтральными упрочнителями (Al, Sn, Zr и др.) технологичность уменьшается, а прочностные характеристики растут. Именно поэтому сплавы данного класса (не упрочняемые термической обработкой) не могут быть одновременно высокопрочными и высокотехнологичными.

Титановые ($\alpha+\beta$)-сплавы. Сплавы данной группы обладают значительно более высокой прочностью по сравнению с другими. Условно их можно разделить на две группы: сплавы критического (более высоколегированные, высокопрочные, но малопластичные) и докритического (не столь высокопрочные, но заметно более технологичные) составов. Несмотря на привлекательный комплекс прочностных характеристик, большинство сплавов данной группы не могут подвергаться холодной деформации, а запас их технологической пластичности очень мал. В связи с тем, что данные сплавы не способны закаливаться на однофазную β -структуру, на уровень их технологичности в значительной степени влияет структурно-фазовый состав в закаленном или отожженном состоянии. Так, уровень низкотемпературной пластичности обусловлен не только количеством Al, но и общей степенью легирования, соотношением α - и β -фаз в отожженном или закаленном состоянии, в том числе наличием мартенситных α' - или α'' -фаз. Последнее во многом определяется легированием изоморфными или эвтектоидными β -стабилизаторами. Так, на примере сплавов VT16, Ti-10-2-3 и других известно, что преимущественное легирование изоморфными β -стабилизаторами и в особенности V (по сравнению с Mo и эвтектоидными β -стабилизаторами) позволяет повысить технологичность как за счет менее интенсивного упрочнения твердых растворов, так и за счет повышения (в сплавах мартенситного класса) склонности к образованию при закалке с высоких температур мартенситной α'' -фазы, име-

ющей пониженную прочность и, соответственно, повышающей в некоторой степени пластичность. Высокий уровень технологической пластичности вышеперечисленных сплавов также обусловлен пониженным содержанием Al, что снижает степень твердорастворного упрочнения частиц α -фазы и приводит к повышению относительного количества β -фазы в структуре сплава в отожженном состоянии. Типичная прочность полуфабрикатов из данных сплавов в состаренном состоянии может составлять до 1000–1100 МПа, однако по характеристикам штампуемости листовых полуфабрикатов ($K_{\text{выт}}$, $K_{\text{отб}}$, r_{min}) они не могут конкурировать со сплавами группы ОТ4.

Более высокопрочные ($\alpha+\beta$)-сплавы, легированные большим количеством Al, Mo и других β -стабилизаторов, в особенности высоколегированные высокопрочные сплавы критического состава типа VT22, которые еще не способны полностью закаливаться на β -фазу, обладают крайне низкой технологической пластичностью в холодном состоянии, что связано с наиболее высокой среди остальных конструктивных титановых сплавов степенью их твердорастворного и дисперсионного упрочнения и, соответственно, прочностью в отожженном и состаренном состояниях.

Титановые псевдо- β - и β -сплавы. Условно по составу высоколегированные титановые сплавы на основе β -фазы можно разделить на 2 подгруппы: псевдо- β -сплавы с термически или механически нестабильной β -фазой ($K_{\beta}=1,4-2,4$) и со стабильной β -фазой ($K_{\beta}>2,4$). Сплавы последней группы в основном используются как сплавы специального назначения, в частности в химической промышленности или медицине (для применения в качестве материалов имплантов). Они обладают высокой коррозионной стойкостью в агрессивных средах, в некоторых случаях превышающей стойкость чистого титана, и высокой бионейтральностью, что обусловлено особым подходом к легированию (преимущественно Ta, Nb, Mo, Zr и другими элементами). В качестве конструктивных материалов эти сплавы не нашли широкого применения вследствие большого содержания дорогостоящих легирующих элементов, высокой плотности и неспособности к эффективному термическому упрочнению, что существенно снижает их удельные характеристики.

Таким образом, наибольший интерес для практического применения в виде листовых материалов для авиационной и космической отраслей представляют менее легированные псевдо- β -сплавы с термически нестабильной β -фазой, которые могут быть существенно упрочнены термической обработкой. При этом потенциально достижимые значения прочностных характеристик по своему уровню практически не уступают аналогичным значениям многих высокопрочных ($\alpha+\beta$)-сплавов. Отмечено, что высокопрочные псевдо- β -титановые сплавы характеризуются вы-

сокими показателями сопротивления усталости и вязкости разрушения при значительных прочностных характеристиках. Сплавы данной группы обладают пониженной склонностью к водородной хрупкости, что обусловлено более высокой (по сравнению с α -фазой) степенью предельной растворимости водорода в β -фазе титана. При условии оптимального легирования существует возможность реализовать высокую технологичность в закаленном состоянии, что позволит осуществлять некоторые операции обработки давлением (получение тонколистового проката, листовая штамповка, в том числе сложнопрофильных изделий, вытяжка, гибка и отбортовка) при комнатной температуре. Стоит отметить, что лишь псевдо- β - и β -сплавы обладают эффектом самозакаливании на β -фазу при обработке заготовок различного сортамента в вакуумных или аргоно-вакуумных печах, т. е. без переноса в закалочную среду (вода, масло) при охлаждении садки, что существенно снижает риск возникновения поволоков в деталях. Эти сплавы обладают значительно большей глубиной прокаливаемости, чем $(\alpha+\beta)$ -сплавы, что позволяет изготавливать из них крупногабаритные, массивные детали.

Таким образом, псевдо- β -титановые сплавы наиболее перспективны при решении задачи получения высокотехнологичного и высокопрочного сплава, предназначенного для изготовления сложнопрофильных листовых конструкций и других деталей планера для современных и перспективных изделий авиационного транспорта, при конструировании которых выдвигаются повышенные требования к удельным прочностным и ресурсным характеристикам применяемых материалов при условии снижения стоимости их производства.

Попытки создания высокопрочных титановых сплавов на основе β -фазы (в том числе и для холодной листовой штамповки) предпринимаются достаточно давно. За рубежом одним из первых образцов подобного сплава следует считать сплав Ti-13-11-3 (Ti-3Al-13V-11Cr), созданный в США [8], а в России – сплавы TC6 (Ti-3Al-6V-5Mo-11Cr) и BT15 (Ti-3Al-7Mo-11Cr). Эти сплавы имеют коэффициент стабилизации β -фазы, равный $\sim 2,4$, и являются высоколегированными β -сплавами.

Однако всесторонние исследования этих сплавов, содержащих большое количество β -эвтектоидного элемента – Cr, выявили их существенные недостатки [9].

Во-первых, стабильность β -фазы и, соответственно, склонность к старению оказались сильно зависящими от содержания легирующих элементов и примесей, ликвация которых по слитку и внутри зерна выше, чем у менее легированных хромом сплавов. Во-вторых, длительная выдержка при температуре 200–250°C и напряжении, близком к пределу пропорциональности, приводили к резкому охрупчиванию сплава, что связано

с началом эвтектоидного распада, сопровождающегося выделением в структуре этих сплавов интерметаллидов TiCr₂. Эвтектоидный распад также обуславливает охрупчивание сварного шва этих сплавов после старения.

В связи с этим вышеперечисленные сплавы не нашли широкого применения, значение хрома как легирующей добавки несколько уменьшилось, и исследования, направленные на разработку состава нового псевдо- β -сплава, были продолжены.

С учетом того, что сплавы титана с хромом отличаются хорошим сочетанием прочности и пластичности, а одна из важнейших закономерностей в тройных системах «титан–изоморфные β -стабилизаторы–эвтектоидные β -стабилизаторы» заключается в том, что изоморфные β -стабилизаторы оказывают тормозящее действие на скорость эвтектоидного распада, хром в несколько меньших количествах, а также в совокупности с молибденом и другими β -изоморфными элементами и в настоящее время входит в состав многих сплавов (в частности Beta C, Ti-17 и др.) [10, 11].

Во многих сплавах, разработанных с целью замены первых высоколегированных хромом псевдо- β -титановых сплавов, разработчики отдали предпочтение изоморфным β -стабилизаторам. В ряде сплавов, таких как Ti-8823, Ti-15-3, BT32 и BT35, эвтектоидные β -стабилизаторы использованы в качестве дополнительных легирующих элементов в количествах, не превышающих обычно 2–4% (по массе), что гарантировало отсутствие их негативного воздействия на ликвационные явления в слитках и показатели термической стабильности. Применение преимущественно изоморфных β -стабилизаторов, в основном молибдена и ванадия, несмотря на их довольно высокую стоимость, позволило создать сплавы без вышеперечисленных недостатков и значительно расширить возможность применения псевдо- β -сплавов в авиационной и космической промышленности.

Молибден (Mo) среди остальных изоморфных β -стабилизаторов наиболее эффективно стабилизирует β -фазу и упрочняет сплавы как в отожженном, так и в состаренном состоянии, повышает коррозионную стойкость в восстановительной атмосфере. Однако отмечено, что сплавы с большим содержанием молибдена (>8% (по массе)) проявляют склонность к ликвации при выплавке слитков [8], к тому же стоимость молибдена до сих пор остается достаточно высокой.

Преимущественное легирование ванадием (V) позволяет создать наиболее технологичные псевдо- β -титановые сплавы. В качестве примера одного из сплавов такого рода можно привести японский сплав DAT 51 (Ti-4Al-22V, [Mo]_{экр}=15,7% [8]). Ванадий умеренно упрочняет β -матрицу сплава и позволяет сохранить высокую пластичность, к тому же он практически не склонен к ликвации при выплавке слитков. Характеристики его

деформационной способности при стандартных условиях сравнимы с малолегированными сплавами и техническим титаном, однако потенциальный предел повышения его прочностных свойств путем термической обработки серьезно ограничен, к тому же сплав отличается низким модулем упругости. По этим причинам дальнейшее развитие псевдо- β -сплавов на основе ванадия направлено на повышение прочностных характеристик. Именно с этой целью на основе и для замены сплава DAT 51 посредством дополнительного легирования Sn и Cr созданы сплавы Ti-4Al-20V-1Sn и DAT 55G (Ti-4Al-15V-6Cr, $[Mo]_{\text{экв}}=20,7\%$ [8]). Олово в совокупности с алюминием стабилизирует и упрочняет дисперсную α -фазу в структуре состаренного сплава. Хром в отличие от ванадия значительно сильнее упрочняет сплав и в большей степени стабилизирует β -фазу. Несмотря на более высокий молибденовый эквивалент и ожидаемо меньшее количество α -фазы в состаренном состоянии, в структуре сплава DAT 55G (в сравнении со сплавом DAT 51) комплекс прочностных свойств сплава значительно выше. Отчасти это объясняется тем, что хром (как и железо) в сравнении с другими традиционно используемыми для легирования титановых сплавов элементами имеет наиболее высокую диффузионную подвижность и в определенной степени повышает скорость протекания процессов распада β -фазы при старении [12].

Еще одним часто применяемым эвтектоидным легирующим элементом является железо, которое, как и хром, используется во многих сплавах, содержащих для предотвращения эвтектоидного распада молибден или другие легирующие элементы изоморфной группы. Среди разработанных на данный момент высоколегированных сплавов с высоким содержанием железа можно выделить: Ti-8-5-1 (Ti-8V-5Fe-1Al), Timetal 125 (Ti-6V-6,2Mo-5,7Fe-3Al), Timet LCB (Ti-6,8Mo-4,5Fe-1,5Al) и некоторые другие, в которых относительная степень легирования железом составляет $\geq 30\%$ от содержания всех β -стабилизаторов, а с учетом эффективного влияния на суммарный $[Mo]_{\text{экв}}$ сплава она еще выше. Высокопрочный сплав Timetal 125 (разработка США), предназначенный для изготовления крепежных деталей, обладает высокими прочностными характеристиками при растяжении и на срез в термически упрочненном состоянии при сохранении допустимо низкой пластичности и более высокой, чем у сплава VT6 и технического титана (CP Grade 2), стойкостью к общей коррозии [13]. Информации о широком использовании данного сплава в промышленности в открытой печати практически не представлено. Сплав Timetal LSB предназначен, в первую очередь, для использования в автомобильной промышленности (пружины, подвески, торсионы) [14]. Он достаточно хорошо исследован, а возможности его обработки освещены в научной

литературе [14–16]. Благодаря высокой степени легирования ($[Mo]_{\text{экв}}=18,1\%$ [8]) он сохраняет многие достоинства псевдо- β -сплавов и является удачной попыткой использовать дешевые компоненты для легирования. Сплав обладает высокими прочностными характеристиками, сопротивлением усталости и коррозии. Вместе с тем прочность сплава в закаленном состоянии достаточно велика [16], что осложняет и удорожает его обработку при пониженных температурах и не позволяет использовать процесс холодной штамповки, хотя этот сплав и обладает большим запасом технологической пластичности. Стоит отметить, что данных по термической стабильности сплава Timetal LSB (как и ряда других сплавов с большим содержанием железа) при наиболее характерных для конструктивных титановых сплавов максимальных эксплуатационных температурах (300–350°C) в научной литературе практически не представлено.

Исследования высоколегированных титановых сплавов различных составов, проведенные в ВИАМ*, показали, что сплавы с высокой степенью легирования железом и хромом обладают более низкой термической стабильностью после изотермических выдержек при температурах 300–400°C на базе ~1000 ч по сравнению со сплавами, преимущественно легированными изоморфными β -стабилизаторами. Исходя из этого можно сделать вывод, что реальная максимальная эксплуатационная температура подобных сплавов зачастую должна быть заметно ниже, чем температура их аналогов.

Несмотря на хорошие технологические характеристики и высокий комплекс механических свойств сплавов, преимущественно легированных Cr, Fe и Mo, возможность успешного их применения в промышленности осложняется рядом серьезных недостатков.

Как было отмечено ранее, одним из основных технологических недостатков сплавов, в которых легирование осуществляется преимущественно Fe, Cr и некоторыми другими легирующими элементами, является их высокая склонность к образованию ликвационной неоднородности при выплавке слитков. Отмечено, что уже при относительно небольших концентрациях Fe, как в сплаве Ti-10V-2Fe-3Al, проблема образования химических неоднородностей (обогащенных Fe и обедненных Al областей) в слитках является актуальной [17]. Вышеотмеченные дефекты, как известно, приводят к общему снижению комплекса эксплуатационных свойств материала вследствие образования структурных неоднородностей, неизбежно приводящих к повышенному разбросу значений механических свойств по сечению полуфабриката. На основе приведенного примера понятно, что многие сплавы, легированные Fe в большем количестве, еще более склонны к образо-

*Работа выполнена при участии д.т.н. Н.А. Ночовой.

ванию ликвационной неоднородности. В случае легирования Cr, Mo и другими элементами их предельные концентрации, при которых начинает проявляться склонность к образованию ликвационных дефектов в процессе вакуумно-дуговой выплавки слитков, отличаются и зависят от многих факторов, в первую очередь, от химического состава сплава, схемы и параметров технологического режима выплавки.

Результаты

Анализ, представленный выше, позволяет считать, что в настоящее время решения задачи получения оптимального, технологичного и высокопрочного сплава для холодной листовой штамповки нет и существует необходимость дальнейшего его поиска.

Исходя из отечественного и мирового опыта в области разработки и исследований псевдо- β -титановых сплавов, а также анализа научно-технических и патентных источников, можно сформулировать основные условия, необходимые для получения требуемого комплекса характеристик разрабатываемого сплава. К их числу относятся:

- приемлемый коэффициент стабилизации β -фазы $K_{\beta}=1,5-2,1$. Нижний предел (1,5) общей степени легирования обусловлен снижением эффекта самозакаливания, понижением технологичности сплава в закаленном состоянии и усложнением технологии изготовления листовых полуфабрикатов из него; верхний предел (2,1) – повышением плотности сплава и стабильности β -твердого раствора, в результате чего снижается эффективность упрочняющей термической обработки и т. д.;

- оптимальное содержание Al: 1,5–3,5% (по массе). При превышении уровня содержания алюминия резко снижается технологичность сплава, что связано с высокой упрочняющей способностью алюминия и стабилизацией им малопластичной α -фазы. При концентрациях Al < 1% (по массе), в ряде сплавов зачастую происходит образование крайне нежелательной атермической ω -фазы, резко снижающей пластичность материала;

- предпочтительное содержание нейтральных упрочнителей (Sn, Zr): 0,5–4% (по массе). Введение указанных элементов обосновано в качестве дополнительных мер, предотвращающих образование атермической ω -фазы. Кроме этого, они упрочняют α -фазу и позволяют добиться большего эффекта от старения. Ограничение максимального содержания обусловлено высокой плотностью данных элементов (в особенности олова);

- соотношение изоморфных и эвтектидных β -стабилизаторов ($C_{\text{изом}}/C_{\text{эвт}}$) должно находиться в пределах от 3:1 до 1:1. Такой диапазон требуется для обеспечения необходимого комплекса эксплуатационных свойств разрабатываемого сплава и обусловлен установленными для гетерофазных

титановых сплавов закономерностями изменения прочностных, пластических характеристик и показателей термической стабильности [18, 19];

- содержание Mo и V должно варьироваться в пределах 1–8 и 5–15% (по массе) соответственно. Молибден является сильным упрочнителем как α -, так и β -твердых растворов. Его содержание в сплаве взаимосвязано с количеством других легирующих элементов. Преимущественное легирование молибденом делает сплав высокопрочным и малопластичным, а легирование в недостаточных количествах – малопрочным. Ванадий не является таким сильным упрочнителем, как Mo, но совместно с ним позволяет получить очень хорошую комбинацию высокой пластичности и высокой прочности, что и требуется при разработке универсального высокотехнологичного сплава;

- приемлемое содержание Cr и Fe должно варьироваться в пределах 0,5–6 и 0,3–3% (по массе) соответственно. Хром и тем более железо являются легирующими элементами, которые не только хорошо упрочняют β - и α -твердый раствор, но и позволяют получить значительный эффект от термической обработки. Вместе с тем превышение указанных концентраций приведет к образованию интерметаллидных частиц в процессе длительной изотермической выдержки при повышенных температурах при эксплуатации и к соответствующей потере пластичности сплава. В любом случае легирование хромом и железом в обязательном порядке должно сопровождаться введением необходимого количества изоморфных β -стабилизаторов.

С учетом выполнения вышеуказанных требований поиск оптимального состава псевдо- β -сплава, обладающего требуемыми характеристиками, должен проводиться в следующей системе и диапазоне легирования (% (по массе)): Ti-(1,5–3,5)Al-(1–8)Mo-(5–15)V-(0,5–6)Cr-(0,3–3)Fe-Sn-Zr.

Шихтовые наборы составов выбранной системы легирования в большинстве своем могут быть сформированы на основе уже производящихся современной металлургической промышленностью лигатур, таких как: ВХМА-1,2; АМВТ; ВнАл-1Д; ВнАлЖД1 и других. Это решает проблемы разработки технологии получения необходимых лигатур, дополнительной отработки технологии их введения в сплав и удешевляет как разработку сплава, так и его внедрение в промышленность.

Следует также иметь в виду, что с целью улучшения технико-экономических показателей при внедрении и серийном производстве полуфабрикатов из нового сплава помимо оптимизации его состава существует возможность эффективного использования ряда дополнительных технологических подходов.

Так, благодаря способности данного сплава к «самозакаливанию» на β -фазу, значительному запасу технологической пластичности и, соответ-

ственно, возможности по реализации холодной прокатки листовых полуфабрикатов создаются благоприятные условия для применения метода НТМО, что позволит еще больше повысить комплекс его механических и эксплуатационных свойств.

Разработка оптимальной схемы и технологии выплавки слитков сплава может позволить не только избежать макроликваций в нем, но и значительно снизить внутризеренную ликвацию, что стабилизирует свойства сплава и позволит полнее реализовать возможность его упрочнения [20]. Дополнительно качество и однородность исходного слитка можно улучшить благодаря микролегированию редкоземельными (РЗМ) и редкими металлами (РМ) или металлоидами [21–23]. Исследователями установлено, что введение в состав титановых сплавов РЗМ оказывает благоприятное модифицирующее воздействие на структуру, а происходящее при этом микролегирование α - и β -твердых растворов уменьшает величину зерна и улучшает состояние их границ. В результате обеспечивается более однородный и мелкодисперсный распад метастабильных фаз в процессе старения, а также снижается склонность сплава к перегреву при термической обработке в высокотемпературной области [24].

Таким образом, проведение дополнительных теоретических и практических работ в области

исследования влияния микродобавок РМ и РЗМ на структуру и механические свойства псевдо- β -титановых сплавов, а также разработок на их основе новой усовершенствованной композиции высоко-технологичного и высокопрочного сплава – является важной научно-практической задачей.

Обсуждение и заключения

Анализ мирового опыта позволяет сформулировать принципы создания высокопрочного, технологичного сплава для получения листовых полуфабрикатов методами холодной деформации. Наиболее целесообразными являются разработка состава высоколегированного титанового сплава на основе β -фазы и оптимизация технологий его обработки.

Показано, что с целью повышения уровня механических и технологических характеристик нового сплава (помимо оптимизации его химического состава, разработки оптимальных технологий выплавки слитков и изготовления полуфабрикатов из них) необходимо провести дополнительные исследования и реализовать принципы микролегирования РЗМ и РМ.

Решение вышеперечисленных задач позволит получить высоконадежные сложнопрофильные листовые конструкции, спрос на которые в авиакосмической сфере постоянно растет.

ЛИТЕРАТУРА

1. Братухин А.Г., Колачев Б.А., Садков В.В. и др. Технология производства титановых самолетных конструкций. М.: Машиностроение. 1995. 448 с.
2. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. № 3. С. 2–14.
3. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 7–17.
4. Глазунов С.Г., Моисеев В.Н. Титановые сплавы. Конструкционные титановые сплавы. М.: Metallurgia. 1974. 368 с.
5. Моисеев В.Н. Бета-титановые сплавы и перспективы их развития //Митом. 1998. №12. С. 11–14.
6. Materials properties handbook: titanium alloys /Ed. by R. Boyer, G. Welsch, E.W. Collings. ASM International. The Material Information Society. 1994. 1176 p.
7. Хорев А.И., Белов С.П., Глазунов С.Г. Металловедение титана и его сплавов. М.: Metallurgia. 1992. 352 с.
8. Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства: Справочник. М.: ВИЛС–МАТИ. 2009. 520 с.
9. Ширяев А.А., Ночовная Н.А., Анташев В.Г., Алексеев Е.Б. Перспективы и особенности применения современных экономнолегированных высокопрочных титановых сплавов //Технология легких сплавов. 2013. №2. С. 29–35.
10. El-Dhaikh Ali, Schmidt Peter, Christ Hans J. Study on Beneficial Effects of Duplex Aging on Microstructure Phenomena Determining the Fatigue life of the Metastable β -titanium Alloy Ti 38-644 /Proceedings of the 12-th World Conference on Titanium «Ti–2011 Science and Technology». Beijing: Science press. 2012. V. 1. P. 745–749.
11. Aebly-Gautier Elisabeth, Denand Benoit, Teixeira Julien et al. Influence of Microstructure on tensile Properties of β -metastable Ti 17 Alloy /Proceedings of the 12-th World Conference on Titanium «Ti–2011 Science and Technology». Beijing: Science press. 2012. V. 2. P. 1191–1195.
12. Markovsky Pavlo E., Ikeda Masahiko. Balancing of Mechanical Properties of Ti–4.5Fe–7.2Cr–3.0Al Using Thermomechanical Processing and Rapid Heat Treatment //Materials Transactions. 2005. V. 46. №7. P. 1515–1524.
13. Bania P.J., Hutt A.J., Adams R.E. Ultra high strength titanium alloy for fasteners /Proceedings of the 7-th World Conference on Titanium «Ti–92 Science and Technology». 1993. P. 2899–2906.
14. Allen P.G., Bania P.J., Hutt A.J., Combres Y. Timetal LCB: A low cost beta alloy for automotive and other industrial applications /Proceedings of the 8-th World Conference on Titanium «Ti–1995 Science and Technology». London: The Institute of Materials. 1996. V. 1. P. 1680–1684.

15. Titanium and titanium alloys. Fundamentals and applications /Ed. by Leyens C., Peters M. Wiley-VCH, Germany. 2003. 513 p.
16. Jackson M., Dashwood R.J., Christodoulou L., Flower H.M. Wiredrawing of low cost beta titanium (Timetal LCB) /Proceedings of the 10-th World Conference on Titanium «Ti-2003 Science and Technology». Weinheim: WILEY-VCH. 2004. V. 1. P. 357.
17. Yang Zhijun, Kou Hongchao, Zhang Fengshou et al. The Effect of VAR Process Parameters on Beta Flecks Formation in Ti-10V-2Fe-3Al /Proceedings of the 12-th World Conference on Titanium «Ti-2011 Science and Technology». Beijing: Science press. 2012. V. 1. P. 601-604.
18. Способ термической обработки высокопрочных ($\alpha+\beta$)-титановых сплавов: пат. 2465366 Рос. Федерация; опубл. 15.09.2011.
19. Яковлев А.Л., Ночовная Н.А. Влияние термической обработки на свойства листов из высокопрочного титанового сплава BT23M //Авиационные материалы и технологии. 2013. №4. С. 8-13.
20. Ночовная Н.А., Скворцова С.В., Анищук Д.С. и др. Отработка технологии опытного жаропрочного сплава на основе интерметаллида Ti_2AlNb //Титан. 2013. №4. С. 24-29.
21. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий //Труды ВИАМ. 2013. №2. Ст. 01 (viam-works.ru).
22. Хорев А.И. Фундаментальные и прикладные работы по конструкционным титановым сплавам и перспективные направления их развития //Труды ВИАМ. 2013. №2. Ст. 04 (viam-works.ru).
23. Сидоров В.В., Ригин В.Е., Зайцев Д.В., Горюнов А.В. Формирование наноструктурированного состояния в литейном жаропрочном сплаве при микролегировании его лантаном //Труды ВИАМ. 2013. №1. Ст. 01 (viam-works.ru).
24. Хорев А.И., Ночовная Н.А., Яковлев А.Л. Микролегирование редкоземельными металлами титановых сплавов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 206-212.