

УДК 669.245

Е.Н. Каблов¹, О.С. Кашапов¹, П.Н. Медведев¹, Т.В. Павлова¹**ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХФАЗНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ Ti–Al–Sn–Zr–Si–β-СТАБИЛИЗАТОРЫ**

DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-30-37

Рассмотрены результаты экспериментальных исследований кованных прутков из двухфазного титанового сплава системы Ti–Al–Sn–Zr–Si–β-стабилизаторы. Особенностью исследованного сплава является достаточно высокий уровень легирования элементами, стабилизирующими β-фазу: композицию сплава подбирали таким образом, чтобы обеспечить после закалки в воде ромбический мартенсит. Исследования проводили на прутках, кованных при температуре двухфазной области. В процессе работы проведен рентгеноструктурный фазовый анализ материала прутков после закалки, старения и отжига; определены характеристики кратковременной прочности и исследована микроструктура материала.

Ключевые слова: титановые сплавы, мартенсит, прочность, микроструктура, твердорастворное упрочнение, дисперсионное упрочнение.

E.N. Kablov¹, O.S. Kashapov¹, P.N. Medvedev¹, T.V. Pavlova¹**STUDY OF A α+β-TITANIUM ALLOY BASED ON A SYSTEM OF Ti–Al–Sn–Zr–Si–β-STABILIZING ALLOYING ELEMENTS**

The article reviews the results of experimental studies of α+β forged bars from a titanium alloy based on a composition of Ti–Al–Sn–Zr–Si–β-stabilizing alloying elements. The characteristic feature of this alloy is the quite high level of β-stabilizing alloying elements. The alloy composition was selected in order to obtain a rhombic martensite after water quenching. The studies were carried out on α+β forged bars at temperatures of the single-phase region. X-ray phase analyses of the bar material were carried out after quenching, aging and annealing. The characteristics of strength and the microstructure of the material were examined.

Keywords: titanium alloys, martensite, strength, microstructure, solid-solution hardening, precipitation hardening.

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

Малолегированные двухфазные титановые сплавы наиболее широко применяются для изготовления деталей и сварных узлов ротора компрессора отечественных авиационных газотурбинных двигателей. Первыми промышленными двухфазными титановыми сплавами, разработанными во ФГУП «ВИАМ», были именно жаропрочные сплавы марок ВТЗ (несколько позднее появилась его модификация – сплав ВТЗ-1 системы Ti–Al–Mo–Cr–Fe–Si [1]) и ВТ8 системы Ti–Al–Mo–Si–β-стабилизаторы. При одинаковом уровне содержания алюминия и кремния сплавы отличались содержанием β-стабилизирующих элементов и, соответственно, количеством стабильной β-фазы. В дальнейшем, при развитии отечественных титановых сплавов старались придерживать-

ся того же уровня легирования тугоплавкими элементами, стабилизирующими β-фазу, что обусловлено рядом причин, в том числе:

- снижением характеристик жаропрочности при температурах >400 °С;
- возрастанием ликвационной неоднородности в промышленных слитках;
- вероятностью появления тугоплавких включений, особенно при применении двойных лигатур типа «алюминий–молибден».

Современные титановые сплавы, применяемые для деталей двигателя, также в основном относятся к двухфазным, с содержанием стабильной β-фазы на уровне 8–18% (ВТ8-1, ВТ8М-1, ВТ25У) [2–4]. Отметим, что двухфазные жаропрочные титановые сплавы, разработанные во ФГУП «ВИАМ», имеют более высокий уровень характеристик механических свойств, обеспечивают работоспособность

деталей при больших рабочих температурах по сравнению с зарубежными титановыми сплавами псевдо- α -класса (IMI 829, Ti-6242S), что в общем случае достигается путем сочетания механизмов твердорастворного и дисперсионного упрочнения, в том числе интерметаллидными фазами типа $Ti[Zr]_5Si_3$ [5].

До температур 450–550 °С малолегированные двухфазные титановые сплавы имеют ряд преимуществ перед малолегированными псевдо- α -титановыми сплавами (с содержанием стабильной β -фазы – до 5%): более высокую технологичность при горячей деформации в двухфазной области, высокие прочностные характеристики и сопротивление усталости, низкую чувствительность к концентраторам напряжений (при содержании кремния – до 0,25% (по массе)), высокие вязкость разрушения и характеристики трещиностойкости. В последнее время отмечают также меньшую склонность этих сплавов к образованию преимущественной кристаллографической ориентации зерен и структурных составляющих и в связи с этим – меньшую чувствительность к задержке при максимальном напряжении в цикле при испытаниях на малоцикловую усталость с контролем деформации образца [6].

За рубежом имеется значительный опыт по применению более легированных двухфазных титановых сплавов для изготовления дисков и лопаток компрессора. Для крупных дисков вентилятора и компрессора применяется высоколегированный двухфазный титановый сплав Ti17 (Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr). Для дисков и рабочих колес компрессора низкого давления и первых ступеней компрессора высокого давления применяют сплав Ti-6246 (Ti-6Al-Sn-4Zr-6Mo) [7–10]. Отметим, что для силовых деталей планера самолета F-22 применяется сплав Ti-62222S, первоначально разработанный как материал для дисков компрессора. Интерес к этому сплаву как к высокопрочному жаропрочному материалу проявляют и в настоящее время [11, 12].

Проанализировав составы и характеристики описанных сплавов, можно сделать вывод о том, что при использовании базовых легирующих элементов (путем оптимизации композиции и химического состава сплава) вполне возможно получить более высокий уровень прочностных характеристик при сохранении удовлетворительной технологичности в металлургическом производстве. Существенным образом повысить характеристики прочности возможно путем эффективного дисперсионного структурного упрочнения, непосредственным образом связанного с композицией и содержанием легирующих элементов сплава. В качестве примера можно

привести новый титановый сплав с содержанием β -фазы до 5% [13], относящийся к псевдо- α -классу и обладающий прочностью на уровне высокопрочных сплавов типа Ti-62222S, Ti-6246, BT22 и BT23 [14, 15]. Высокий уровень прочности в данном случае обусловлен высокодисперсной дуплексной (глобулярно-пластинчатой и бипластинчатой) или триплексной (с первичной, вторичной и третичной α -фазой) микроструктурой, стабильно получаемой вследствие расслоения твердых растворов в процессе охлаждения после деформации и термической обработки на твердый раствор [16].

Интенсивное внедрение современных технологий сварки, в том числе в твердой фазе, при производстве деталей и узлов ротора компрессора, а также применение новых материалов [17–21] открывает новые преимущества для более легированных двухфазных титановых сплавов. В процессе охлаждения сварного шва с температур β -области в материале зоны термического влияния и непосредственно шва образуется ромбический α'' -мартенсит, который имеет относительно высокую пластичность и распадается при низких температурах старения. Это позволяет, например, изготавливать монолитные рабочие колеса сваркой, проводить их послесварочный отжиг при низких температурах, практически полностью исключая коробление.

В то же время к концу 1980-х годов в металлургической промышленности внедрены новые тройные и четверные лигатуры типа «алюминий–титан–тугоплавкие металлы», усовершенствованы режимы вакуумно-дугового переплава, осваиваются новые методы плавления титановых сплавов [22, 23]. Ранее приведенные данные, а также имеющийся во ФГУП «ВИАМ» опыт позволяют рассчитывать на улучшение металлургического качества высоколегированных двухфазных сплавов и обеспечить дальнейшее повышение прочностных характеристик сплавов для роторных деталей компрессора. Данная работа посвящена изучению материала прутков из опытного высоколегированного двухфазного титанового сплава системы Ti-Al-Sn-Zr-Si- β -стабилизаторы. При выборе композиции за основу взята система легирования сплава BT3-1, в которой увеличено содержание изоморфных β -стабилизаторов, снижено содержание эвтектоидных β -стабилизаторов, алюминия и кремния, добавлены олово и цирконий.

Исследование проведено при поддержке РФФИ в рамках проекта «Исследование закономерностей формирования текстуры рекристаллизации в псевдо-альфа и альфа+бета титановых сплавах системы Ti-Al-Sn-Zr-Si-бета

Химический состав исследуемого сплава

Содержание основных легирующих элементов				Содержание примесей, % (по массе)			
[Al] _{eq}	Al, % (по массе)	[Mo] _{eq}	Si, % (по массе)	O	N	H	C
8,15	5,95	6,75	0,19	0,06	0,005	0,01	0,05

стабилизаторы для моделирования технологии их термомеханической обработки» и соответствует комплексному научному направлению 8. «Легкие, высокопрочные коррозионностойкие свариваемые сплавы и стали, в том числе с высокой вязкостью разрушения», реализуемому во ФГУП «ВИАМ» [18].

Материалы и методы

В качестве материала для проведения исследований использовали кованные прутки квадратного сечения со стороной 15 мм. Исходный слиток сплава массой 15 кг выплавляли методом двойного вакуумно-дугового переплава. При шихтовке использовали промышленные лигатуры и чистые компоненты отечественного производства. Химический состав сплава, выраженный в структурных эквивалентах по алюминию и молибдену [24], а также содержание алюминия, кремния и примесей приведены в табл. 1.

Слиток ковали на прессе по следующей схеме: всесторонняя ковка слитка со сменой оси в однофазной β -области, охлаждение→осадка промежуточной заготовки в двухфазной области→подогрев с перекристаллизацией в однофазной области, всесторонняя ковка, охлаждение→подогрев при температурах двухфазной области, всесторонняя ковка, протяжка на пруток, подогрев, осадка по образующей, огранка, охлаждение. Полученную заготовку в виде плиты сечением ~20 мм резали на мерные заготовки 200×20×40 мм, которые проковывали на прутки квадратного сечения со стороной квадрата 15 мм на молоте при температурах двухфазной области с промежуточными подогревами. Готовые прутки (рис. 1) охлаждали на воздухе.

Термическую обработку прутков проводили в лабораторной печи в мерных заготовках, предназначенных для изготовления образцов. Использовали следующие режимы термической обработки:

1 – двойной отжиг при температурах двухфазной области (типовой режим для большинства двухфазных сплавов, заключающийся в высокотемпературной обработке на твердый раствор с последующим низкотемпературным старением [25]);

2 – двойной отжиг – кратковременный отжиг при температуре, соответствующей

однофазной β -области, охлаждение с регламентированной скоростью в печи (скорость охлаждения на порядок ниже, чем в случае режима 1), старение;

3 – закалка в воде с температуры однофазной области после кратковременной выдержки;

4 – закалка в воде с температуры однофазной области после кратковременной выдержки, двойной отжиг по режиму 1;

5 – закалка в воде с температуры однофазной области после кратковременной выдержки, старение при температуре на 80 °С выше, чем температура старения, применяемая при двойном отжиге.

При проведении исследований определяли механические свойства при растяжении при комнатной температуре на стандартных образцах с рабочей частью $\varnothing 5$ мм по ГОСТ 1497–84. Микроструктуру исследовали методом оптической микроскопии на травленых микрошлифах (использовали раствор для травления, являющийся слабым водным раствором плавиковой и азотной кислот). Для материала, термообработанного по режимам 3 и 5, ввиду высокой дисперсности структуры, получить удовлетворительные изображения методом оптической микроскопии не представляется возможным. При исследовании фазового состава использовали те же образцы, что и для



Рис. 1. Прутки после деформации

оптической металлографии. Рентгеноструктурный фазовый анализ проводили на дифрактометре Empyrean фирмы PanAlytical. Регистрация дифрактограмм проведена на рентгеновском дифрактометре в монохроматическом $\text{Cu } K_{\alpha}$ -излучении в геометрии Брэгга–Брентано. Расшифровка дифрактограмм проведена с помощью специализированной программы HighScore и структурной базы данных PDF-2. Расчет параметров решетки фаз проведен с помощью полнопрофильного анализа рентгеновского дифракционного спектра по методу Паули.

Результаты и обсуждение

Типичная микроструктура, механические свойства при растяжении, а также удельная работа разрушения при испытаниях на ударную вязкость материала приведены в табл. 2,

рентгенограммы материала прутков, термообработанных по различным режимам, – на рис. 2, параметры элементарной ячейки – в табл. 3.

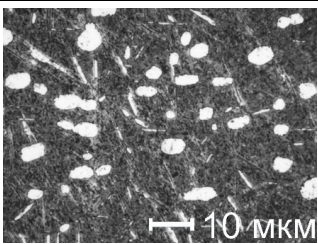
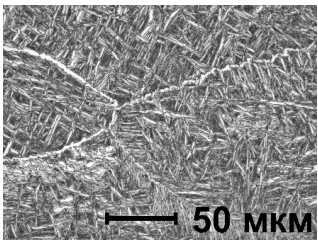
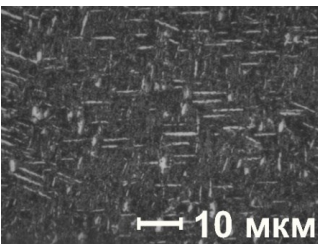
Рассмотрим полученные результаты с учетом степени легирования исследованного сплава, согласно принятой классификации. На рис. 3 показан уровень легирования сплавов элементами, стабилизирующими β -фазу, выраженный в структурном эквиваленте по содержанию молибдена [24].

Сплавы VT25У, Ti-62222S, VT3-1, Ti-6246 при термической обработке по режиму двойного отжига находятся на одинаковом уровне прочности – около 1130–1180 МПа, имея разное содержание стабильной β -фазы.

При закалке в воде из однофазной β -области в сплаве VT3-1 еще фиксируется хрупкий α' -мартенсит с ГПУ-ячейкой,

Таблица 2

Микроструктура и механические свойства исследуемого сплава при 20 °С (по испытаниям трех образцов)

Режим термической обработки	Микроструктура материала	Прочностные характеристики			
		$\sigma_{0,2}$	σ_b	δ	ψ
		МПа		%	
1 – двойной отжиг в двухфазной области		1300	1400	7,4	15,8
		1295	1395	7,3	18,3
		1300	1400	6,1	22,8
2 – β -отжиг, охлаждение с печью, старение		1100	1195	13,2	17,4
		1090	1195	12,7	22,5
		1095	1200	13,0	23,0
3 – закалка из β -области	–	450	1080	6,0	9,1
		430	1055	6,2	8,5
		–	1100	6,0	8,8
4 – закалка из β -области, двойной отжиг		–	1250	Хрупкое разрушение	
		–	1300		
		–	1280		
5 – закалка из β -области, старение	–	1300	1340	7,3	14,0
		1290	1350	6,7	14,2
		1300	1350	5,3	13,8

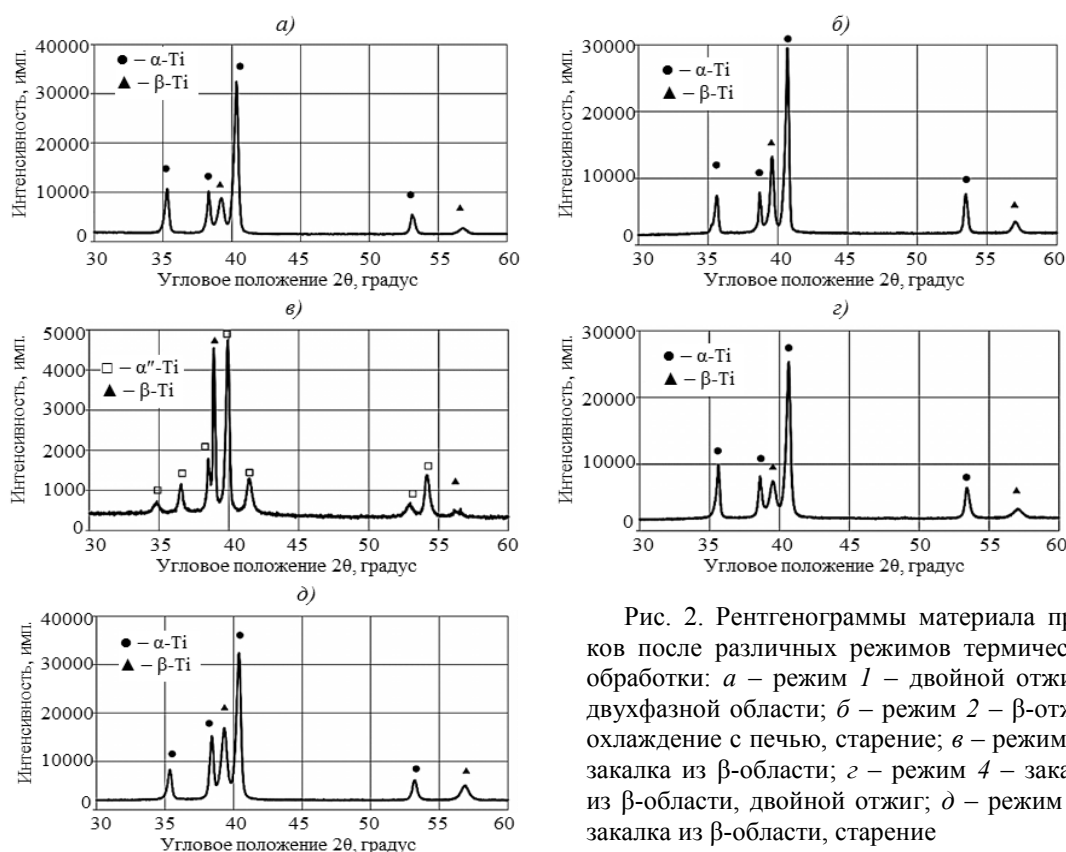


Рис. 2. Рентгенограммы материала прутков после различных режимов термической обработки: *а* – режим 1 – двойной отжиг в двухфазной области; *б* – режим 2 – β-отжиг, охлаждение с печью, старение; *в* – режим 3 – закалка из β-области; *г* – режим 4 – закалка из β-области, двойной отжиг; *д* – режим 5 – закалка из β-области, старение

который может полностью распасться только при отжиге, начиная с температуры 750 °С. Сплав Ti-6246 стабильно закаливается на ромбический мартенсит, поэтому для исследуемого сплава с большим уровнем легирования фазовый состав после закалки в воде также предположительно должен быть аналогичен составу сплава Ti-6246. Рентгеноструктурный фазовый анализ показал, что после закалки (режим 3, рис. 2, в) в исследуемом сплаве фиксируется ромбический α''-мартенсит, а также β-фаза. Наличие пластичного α''-мартенсита подтверждается результатами испытаний на рас-

тяжение – резким падением значений предела текучести и кратковременной прочности по сравнению со значениями в отожженном состоянии (табл. 2). В закаленном состоянии сплав обладает удовлетворительной пластичностью, в то время как менее легированные серийные двухфазные сплавы после закалки обладают величиной относительного удлинения на уровне δ≈1,5% [1].

Прутки с глобулярно-пластинчатой микроструктурой в состоянии после двойного отжига (режим 1) имеют предельно высокий уровень прочности с сохранением пластических характеристик. Отметим, что

Таблица 3

Параметры элементарной ячейки (в нм) обнаруженных фаз

Режим термической обработки	α-Ti (ГПУ)*		β-Ti (ОЦК)**	α''-Ti (ромбическая решетка)		
	<i>a</i>	<i>c</i>	<i>a</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
1 – двойной отжиг в двухфазной области	0,292935	0,4682339	0,323716	–	–	–
2 – β-отжиг, охлаждение с печью, старение	0,2930424	0,4678117	0,3238334	–	–	–
3 – закалка из β-области	–	–	0,3266975	0,302831	0,4914811	0,4665977
4 – закалка из β-области, двойной отжиг	0,2929233	0,4683782	0,3238806	–	–	–
5 – закалка из β-области, старение	0,2930135	0,4680532	0,3235717	–	–	–

* Гексагональная плотноупакованная структура.
 ** Объемноцентрированная кубическая решетка.

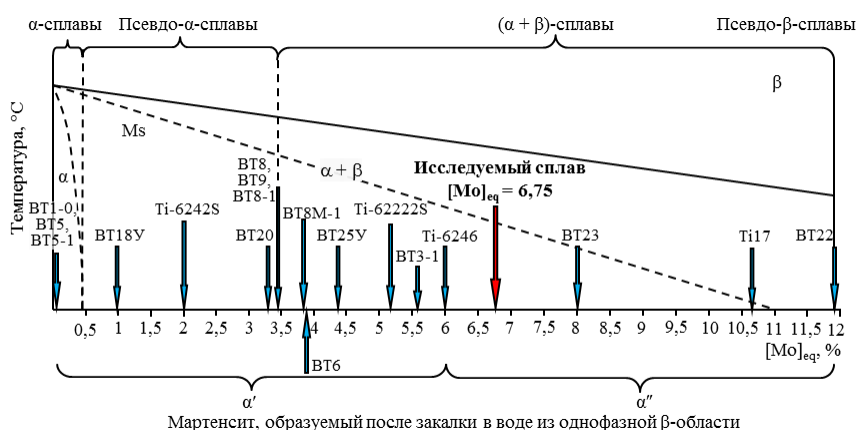


Рис. 3. Уровень легирования титановых сплавов, выраженный в структурном эквиваленте по содержанию β-стабилизирующих элементов

высокий уровень прочности в определенной мере связан с высокой скоростью охлаждения заготовок на воздухе; при термической обработке заготовок под образцы в малых сечениях скорость охлаждения может составлять ~150 °C/мин.

После отжига в однофазной β-области с регламентированной скоростью охлаждения и старения материал прутков имеет превращенную пластинчатую микроструктуру. Отличительными особенностями полученной микроструктуры от типичной структуры двухфазных титановых сплавов после β-отжига являются относительно тонкая α-оторочка по границам β-зерна (рис. 4, а) и преимущественная морфология выделения пластин α-фазы в виде корзинчатого плетения (рис. 4, б), несмотря на низкую скорость охлаждения с температуры β-области. После термической обработки по данному режиму фазовый состав материала следует рассматривать как более близкий к равновесному.

Прямое сравнение параметров решетки α-фазы для режимов 1 и 2, возможно, не

совсем корректно, так как в первом случае глобули первичной α-фазы и пластинки превращенной вторичной α-фазы различны по химическому составу, а в случае режима 2 химический состав пластин α-фазы однороден. Параметр ОЦК-решетки β-фазы во втором случае несколько выше, чем в первом, что подтверждает вывод о большем уровне легирования, а значит, и большей стабильности β-фазы (концентрация легирующих элементов, стабилизирующих β-фазу, увеличивается, а алюминия – снижается). Хорошо известно, что с уменьшением скорости охлаждения после высокотемпературной ступени отжига для двухфазных титановых сплавов с пластинчатой микроструктурой снижаются прочностные характеристики и увеличиваются характеристики пластичности [1]. В данном случае наблюдается аналогичная ситуация – материал обладает наибольшими характеристиками пластичности, при этом прочность материала снижается на 200 МПа, оставаясь на уровне легированных двухфазных и псевдо-β-титановых сплавов.

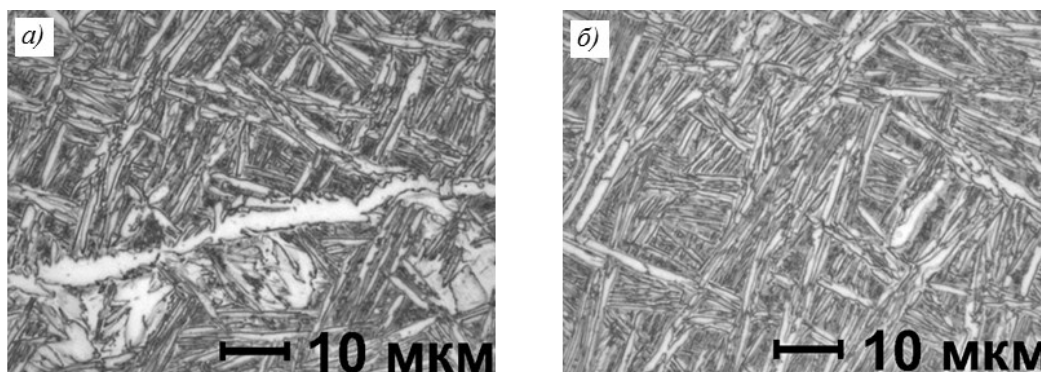


Рис. 4. Микроструктура материала прутка, термообработанного по режиму 2: а – α-оторочка по границе β-зерна; б – типичная микроструктура внутри зерна

Отметим, что, исходя из значений параметров элементарной ячейки материала прутков с глобулярно-пластинчатой и бипластинчатой микроструктурами (режимы 1 и 4), уровни легирования α - и β -твердых растворов схожи. В то же время, из-за высокой объемной доли превращенной α -фазы и наличия крупного β -зерна, при термической обработке по режиму 4 при испытаниях на растяжение наблюдается хрупкое разрушение. Обращает на себя внимание высокая дисперсность частиц α -фазы в структуре материала (табл. 2, рис. 5).

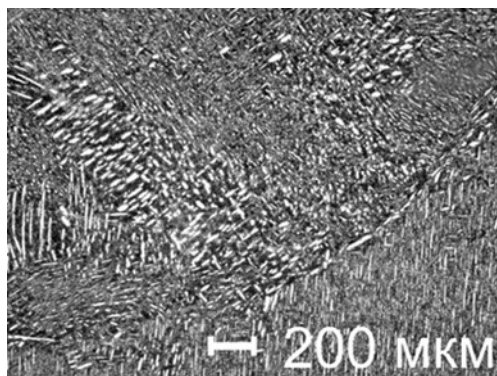


Рис. 5. Микроструктура прутка, термообработанного по режиму 4

После термической обработки по режиму 5 – закалки с температур β -области и старения при относительно высокой температуре – получены высокие показатели прочности при удовлетворительных характеристиках пластичности материала. По сравнению с состоянием после закалки величина относительного удлинения несколько снижается, а относительного сужения – увеличивается в $\sim 1,5$ раза. Оценивая состояние твердых растворов по параметрам элементарной ячейки, видно, что уровень легирования α -фазы достаточно высокий и находится на уровне значений для режима 2, в то время как β -фаза наименее легирована. Вероятно, это свидетельствует о некоторой пересыщенности α -твердого раствора β -стабилизаторами. Для получения более стабильного фазового состава материала после закалки из β -области необходимо увеличивать температуру или продолжительность выдержки при старении.

Заключения

Результаты исследования прутков из двухфазного титанового сплава системы Ti–Al–Sn–Zr–Si– β -стабилизаторы ($[Mo]_{eq}=6,75$) показали, что для исследуемой системы легирования возможно значительное повышение прочностных характеристик деформированного материала в отожженном состоянии. Повышение прочности может быть достигнуто путем структурного дисперсионного упрочнения – в первую очередь увеличением дисперсности α -фазы с различной морфологией в процессе охлаждения после обработки на твердый раствор и старения. Совместный эффект от структурного дисперсионного упрочнения и твердорастворного упрочнения сплава элементами внедрения (кремний, углерод) позволяет получать уровень прочности, характерный для гораздо более легированных сплавов псевдо- β - и β -класса.

Для псевдо- α - и ($\alpha+\beta$)-сплавов системы Ti–Al–Sn–Zr–Si– β -стабилизаторы при рациональном подборе изоморфных и эвтектоидных β -стабилизаторов возможно существенно облегчить процесс рекристаллизации и сфероидизации α -фазы, что подтверждено ранее проведенными работами [16], а также результатами данного исследования. Это позволит упростить технологию горячей деформации, в том числе для операций окончательной деформации при температурах однофазной области, с целью получения микроструктуры типа корзинчатого плетения видманштеттовой), а также рассчитывать на ее стабильное получение по сечению полуфабриката.

Исследование подтвердило возможность получения удовлетворительных характеристик пластичности сплава системы Ti–Al–Sn–Zr–Si– β -стабилизаторы при закалке материала в воде с температур однофазной β -области, а также после старения при температурах неполного отжига, что крайне важно для получения сварных узлов с применением традиционных и новых видов сварки.

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности выбранного направления исследований и продолжении работ в рассматриваемой области.

Библиографический список

1. Солонина О.П., Глазунов С.Г. Жаропрочные титановые сплавы. М.: Металлургия, 1976. 448 с.
2. Павлова Т.В., Кашапов О.С., Кондратьева А.Р., Калашников В.С. Возможности по расширению области применения сплава BT8-1 для дисков и рабочих колес компрессора // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2016. №3 (39). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.09.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-3-5-5.
3. Xuemei Y., Hongzhen G., Zekun Y., Shichong Y. Effect of isothermal forging strain rate on microstructures and mechanical properties of BT25y titanium alloy // Materials Science & Engineering A. 2016. Vol. 673. P. 355–361. DOI: 10.1016/j.msea.2016.07.084.

4. Луценко А.Н., Славин А.В., Ерасов В.С., Хвацкий К.К. Прочностные испытания и исследования авиационных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 527–546. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-527-546.
5. Lutjering G., Williams J.C. *Titanium*. 2nd ed. Verlag; Berlin; Heidelberg: Springer, 2007. 449 p.
6. Bache M.R., Evans W.J., Suddell B., Herrouin F.R.M. The effects of texture in titanium alloys for engineering components under fatigue // *International Journal of Fatigue*. 2001. Vol. 23. P. 153–159.
7. *Titanium and Titanium Alloys. Fundamentals and Applications* / ed. Ch. Leyens, M. Peters. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2003. 513 p.
8. Xu J., Zeng W., Zhou D. et al. Influence of alpha/beta processing on fracture toughness for a two-phase titanium alloy // *Materials Science & Engineering A*. 2018. Vol. 731. P. 85–92. DOI: 10.1016/j.msea.2018.06.035.
9. Alluaibi M.H., Cojocar V.D. Effect of thermomechanical processing and heat treatment on the microstructure evolution of the Ti-6246 alloy // *Materials Science and Engineering. Conference Series*. 2018. No. 454. DOI: 10.1088/1757-899X/454/1/012040.
10. Heutling F., Helm D., Büscher M. et al. Prediction of tensile properties of beta-forged Ti-6246 engine compressor disks // *Proceedings of the 13th World Conference on Titanium. The minerals, metals & materials society*, 2016. P. 1875–1880.
11. Evans D.J., Broderick T.F., Woodhouse J.B., Hoenigman J.R. On the synergism of $\alpha 2$ and silicides in Ti–6Al–Sn–2Cr–2Zr–2Mo–Si // *Titanium'95: Science and Technology*. 1995. P. 2413–2420.
12. Zhang X.D., Evans D.J., Baeslack W.A., Fraser H.L. Effect of long term aging on the microstructural stability and mechanical properties of Ti–6Al–2Cr–2Mo–2Sn–2Zr alloy // *Materials Science and Engineering*. 2003. Vol. A344. P. 300–311.
13. Кашапов О.С., Павлова Т.В., Калашников В.С., Кондратьева А.Р. Исследование влияния содержания легирующих элементов на свойства высокопрочного жаропрочного псевдо- α -сплава ВТ46 // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.* 2016. №9 (45). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.09.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-9-6-6.
14. Путьрский С.В., Арисланов А.А., Яковлев А.Л., Ночовная Н.А. Исследование механических свойств деформированных полуфабрикатов сплавов ВТ23М и ВТ43, оценка их климатической стойкости в условиях арктического климата // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.* 2018. №4 (64). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.09.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-4-101-110.
15. Моисеев В.Н. Высокопрочные титановые сплавы в самолетостроении. 2001. 13 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://viam.ru/public/files/2001/2001-203458.pdf> (дата обращения: 31.08.2019).
16. Кашапов О.С., Павлова Т.В., Калашников В.С., Заводов А.В. Явление образования и низкотемпературного распада метастабильных твердых растворов с выделением дисперсных частиц третичной α -фазы в жаропрочных титановых сплавах // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.* 2018. №8 (68). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.09.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-8-3-22.
17. Каблов Е.Н. Ключевая проблема – материалы // *Тенденции и ориентиры инновационного развития России*. М.: ВИАМ, 2015. С. 458–464.
18. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
19. Каблов Е.Н., Кашапов О.С., Павлова Т.В., Ночовная Н.А. Разработка опытно-промышленной технологии изготовления полуфабрикатов из псевдо- α -титанового сплава ВТ41 // *Титан*. 2016. №2 (52). С. 33–42.
20. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // *Интеллект и технологии*. 2016. №2 (14). С. 16–21.
21. Каблов Е.Н. Материалы и технологии ВИАМ для «Авиадвигателя» // *Пермские авиационные двигатели*. 2014. №31. С. 43–47.
22. *Vacuum Melting and Remelting processes: ASM Handbook*. ASM International, 2008. Vol. 15: Casting. 1226 p. DOI: 10.31399/asm.hb.v15.9781627081870.
23. Patel A., Fiore D. On the Modeling of Vacuum Arc Remelting Process in Titanium Alloys // *Materials Science and Engineering. Conference Series*. 2016. Vol. 143. DOI:10.1088/1757-899X/143/1/012017.
24. Давыденко Л.В., Егорова Ю.Б., Чибисова Е.В. Статистическое сопоставление механических свойств титановых сплавов разных классов // *Известия МГТУ «МАМИ»*. 2013. Т. 2. №1 (15). С. 35–38.
25. Gupta R.K., Kumar V.A., Chhangani S. Study on Variants of Solution Treatment and Aging Cycle of Titanium Alloy Ti6Al4V // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2016. Vol. 25. P. 1492–1501. DOI: 10.1007/s11665-016-1993-8.