

УДК 669.295

*Е.Н. Каблов¹, Н.А. Ночовная¹, А.А. Ширяев¹, Е.А. Давыдова¹***ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ
В ПСЕВДО-β-ТИТАНОВЫХ СПЛАВАХ И ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ
ОХЛАЖДЕНИЯ С ТЕМПЕРАТУРЫ ГОМОГЕНИЗАЦИИ
НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СПЛАВА VT47. Часть 2**

DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-11-19

По результатам анализа научно-технической литературы показано, что на процессы, происходящие при охлаждении, а также на структуру и свойства после изотермических выдержек оказывает влияние значительное число факторов, в том числе особенности структурно-фазовых превращений и полнота протекания процесса рекристаллизации. Проведены исследования влияния различных скоростей охлаждения на структуру и свойства псевдо-β-титанового сплава VT47 после изотермических выдержек. Установлено, что охлаждение в выбранных интервалах скорости не оказывает существенного влияния на твердость по Роквеллу и микроструктуру сплава VT47, а для начальных этапов изотермических выдержек характерно наличие зерен с увеличенным количеством выделений вторичной α-фазы.

Ключевые слова: псевдо-β-титановые сплавы, фазовые превращения, микроструктура, сплав VT47, твердость, скорость охлаждения.

*E.N. Kablov¹, N.A. Nochovnaya¹, A.A. Shiryayev¹, E.A. Davydova¹***INVESTIGATION OF STRUCTURAL AND PHASE TRANSFORMATIONS
IN METASTABLE β-TITANIUM ALLOYS AND EFFECT
OF COOLING RATE FROM HOMOGENIZATION TEMPERATURE
ON STRUCTURE AND PROPERTIES OF VT47 ALLOY. Part 2**

According to the results of scientific and technical literature analysis one can conclude that a large number of factors influence the processes which take place during cooling, as well as the structure and properties after isothermal exposures. Among those factors there are structural and phase transformations features and the completeness of recrystallization processes. The effect of various cooling rates on the structure and properties of isothermally exposed metastable β-titanium VT47 alloy has been studied. It has been revealed that cooling in the selected rate ranges does not exert a significant effect on the Rockwell hardness and microstructure of the VT47 alloy. It has been shown that grains with an increased number of the secondary α-phase precipitates are characteristic for the initial stages of isothermal exposures.

Keywords: metastable β-titanium alloys, phase transformations, microstructure, VT47 alloy, hardness, cooling rate.

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

Метастабильные β-титановые сплавы («metastable β» – [Mo]_{ЭКВ}=10–30%), согласно зарубежной классификации, – большой класс титановых сплавов, существенно отличающихся друг от друга по структурно-фазовому составу, комплексу технологических и механических свойств [1], а также особенностям структурно-фазовых превращений, происходящих при охлаждении из однофазной β-области.

Рассматривая более узкий диапазон легирования титановых сплавов на основе β -фазы ($[\text{Mo}]_{\text{экв}}=14,0\text{--}26,5\%$), в наибольшей степени соответствующий псевдо- β -сплавам согласно отечественной классификации, необходимо отметить, что и для них характерно протекание различных структурно-фазовых превращений (выделение промежуточных β' - и $\omega_{\text{ат}}$ -фаз, вторичной α -фазы).

В результате выделение в матричной β -структуре частиц вторичных или промежуточных фаз (например, β' -фазы) в процессе охлаждения сплава из β -области может заметно влиять на комплекс механических свойств сплава как после гомогенизации, так и при последующем старении.

Таким образом, на уровень механических свойств и однородность структурно-фазового состава полуфабрикатов могут оказывать влияние не только химическая однородность выплавляемых слитков, но и особенности технологии термической обработки деформированных полуфабрикатов и деталей [2].

Известно, что химическая и структурная однородность тесно взаимосвязаны с технологическими параметрами деформационной и термической обработок и оказывают существенное влияние на комплекс механических и эксплуатационных свойств титановых сплавов, в связи с чем проведение исследований в данной области остается актуальной задачей [3, 4].

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 9.2. «Материалы на основе титана с регламентированной β -структурой» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [5–7].

Материалы и методы

Исследования проведены на опытно-промышленной партии листов толщиной 2,3 мм из псевдо- β -титанового сплава BT47, изготовленной в условиях промышленного производства ПАО «Корпорация «ВСМПО-АВИСМА» [8, 9]. Состояние поставки – холодная прокатка с последующим отжигом.

Термическая обработка по экспериментальным режимам проведена в камерной печи сопротивления Nabertherm LN60/40 в воздушной среде с имитацией различных скоростей охлаждения, соответствующих вакуумным печам сопротивления типа Vega-8 и Vega-2M.

Образцы для металлографических исследований изготовлены по стандартной методике, для травления использован раствор на водной основе с добавлением плавиковой и азотной кислот (2,5 мл $\text{HF}+5$ мл $\text{HNO}_3+92,5$ мл H_2O).

Методом оптической микроскопии (ОМ) по ПИ1.2.785–2009 на металлографическом микроскопе Olympus GX51 с цифровым приемником изображения проведены исследования микроструктуры образца. Исследование тонкой структуры осуществлено методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) по ГОСТ Р ИСО 22309–2015 на установке Zeiss EVO MA 10 (фирма Carl Zeiss).

Измерение твердости по Роквеллу (HRC) проведено по ГОСТ 9013–59 на двух образцах на каждый экспериментальный режим термической обработки в объеме 30 отпечатков на каждом образце.

Результаты и обсуждение

Как отмечено в первой части данной статьи, в сплавах типа Timet LCB – $[\text{Mo}]_{\text{экв}}=19,7\%$ (здесь и далее $[\text{Mo}]_{\text{экв}}$ рассчитан по формуле, % (по массе): $[\text{Mo}]_{\text{экв}}=1,0 \text{ Mo}+0,67 \text{ V}+0,44 \text{ W}+0,28 \text{ Nb}+0,22 \text{ Ta}+2,9 \text{ Fe}+1,6 \text{ Cr}+1,25 \text{ Ni}+1,7 \text{ Mn}+1,7 \text{ Co}$) при охлаждении из однофазной β -области возможна не только фиксация

метастабильной β -фазы, но и выделение атермической $\omega_{ат}$ -фазы. Более высокую в сравнении с другими псевдо- β -титановыми сплавами твердость сплава Timet LCB можно объяснить не только с позиции высокой степени стабилизации и легирования β -фазы, но и наличием в структуре сплава частиц атермической $\omega_{ат}$ -фазы [10]. Следует отметить, что, в отличие от изотермической фазы, наличие в структуре сплава Timet LCB атермической $\omega_{ат}$ -фазы подтверждается и обнаруживается не всеми исследователями, что, вероятно, связано с параметрами термической обработки.

Как следует из диаграммы фазовых превращений (рис. 1), образование $\omega_{ат}$ -фазы происходит при охлаждении ниже температуры начала превращения $\beta \rightarrow \omega_{ат}$, значение которой зависит от химического состава сплава и для сплава Timet LCB находится в диапазоне значений от 345 до 390 °С. Таким образом, путем переноса материала при закалке непосредственно в печь, нагретую до температуры изотермической обработки ($\omega_{н} \leq T \leq \omega_{солв}$), возможна фиксация однофазной β -структуры и реализация фазового превращения по схеме $\beta \rightarrow \beta + \omega_{изо} \rightarrow \beta + \alpha$, т. е. без образования $\omega_{ат}$ -фазы [10].

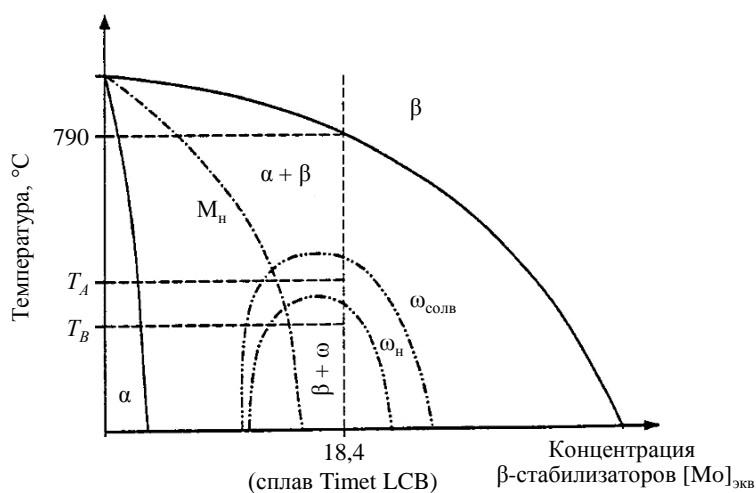


Рис. 1. Псевдобинарная схематическая фазовая диаграмма для сплавов, легированных по аналогии со сплавом Timet LCB состава Ti–1,5Al+ β -стабилизаторы (Mo, Fe) [10]:

$\omega_{солв}$ – кривая ω -солвус, ограничивающая область стабильности изотермической ω -фазы; $\omega_{н}$ – кривая начала выделения атермической $\omega_{ат}$ -фазы, формирующейся по сдвиговому механизму; T_A и T_B – температуры, выбранные авторами работы [10] для описания протекающих структурно-фазовых превращений

Частицы $\omega_{ат}$ -фазы в основном достаточно однородно распределены в структуре псевдо- β -титановых сплавов и являются, как и β' -фаза, центрами зарождения частиц вторичной α -фазы.

Проведенными исследованиями псевдо- β -титанового сплава Timetal 21S ($[Mo]_{экв} = 15,8\%$) показано, что гомогенизация при температурах $>T_{п.п}$ (температура полиморфного превращения), но ниже температуры растворения силицидов приводит к фиксации метастабильной β -фазы, атермической $\omega_{ат}$ -фазы и силицидов (наличие которых в структуре сплава обусловлено химическим составом сплава – добавками кремния) при быстром охлаждении и дополнительного выделения частиц вторичной α -фазы при охлаждении со скоростью 5 °С/мин. При этом плотность выделения частиц вторичной α -фазы преимущественно зависит от полноты протекания процесса рекристаллизации в отдельно взятых зернах. Следует также отметить, что кинетика процесса рекристаллизации в процессе гомогенизации в значительной степени взаимосвязана не только с температурно-временными параметрами термической обработки, но и с объемом предшествующей деформации.

Существенное влияние на характер формирования зародышей новой фазы и на их последующий рост оказывают дефекты кристаллического строения (точечные – вакансии; линейные – дислокации и их скопления), которые за счет искажения кристаллической решетки и создания полей упругих напряжений способствуют образованию в прилежащих микрообъемах химических микронеоднородностей.

Наибольшее значение в зарождении частиц новой фазы при распаде метастабильной β -фазы имеют скопления дислокаций высокой плотности, сформированные в результате пластической деформации. На них возможно образование термодинамически стабильных сегрегаций атомов компонентов, состав и размеры которых достаточны для образования зародыша α -фазы [11]. В закаленном состоянии количество дефектов кристаллического строения существенно меньше, но заметное влияние на их плотность и процессы зарождения на них частиц новой фазы может оказывать также скорость охлаждения.

Как отмечено ранее, в нерекристаллизованных зернах развитая субструктура приводит к увеличению мест предпочтительного зарождения частиц вторичной α -фазы и существенному ускорению кинетики их выделения [12]. Для таких зерен характерна повышенная плотность дефектов кристаллического строения, что проявляется при последующем старении появлением отдельных зерен или групп зерен с аномально большим количеством выделений вторичной α -фазы (рис. 2) [13].

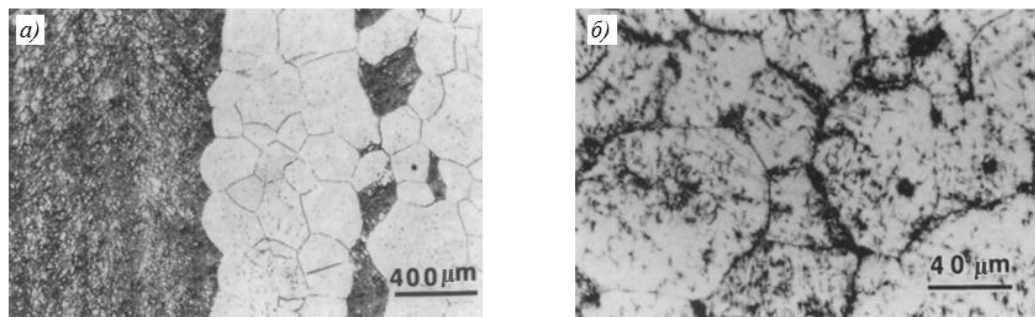


Рис. 2. Микроструктура сплава Timetal 21S после гомогенизации при 900 °С в течение 6 ч и последующего охлаждения со скоростью 5 °С/мин [12]:

a – неоднородная рекристаллизация (деформированный полуфабрикат); *б* – однородная рекристаллизация (лист)

Как известно, в рекристаллизованных и полигонизованных структурах процессы распада метастабильных фаз проходят с существенными отличиями, в особенности при температурах изотермической выдержки, для которых в большей степени характерен гетерогенный механизм зарождения частиц вторичной α -фазы. Большое число субгранц, что характерно для структуры титановых сплавов после возврата и полигонизации, уже на ранних стадиях изотермической выдержки являются предпочтительными местами зарождения частиц вторичной α -фазы и способствуют образованию более однородной и гомогенной по своей морфологии структуре. При этом частицы α -фазы, образовавшиеся на малоугловых субграницах, могут иметь разнонаправленный характер и не лимитированы ориентационным соотношением вектора Бюргера дислокационных скоплений, образованных холодной прокаткой [14].

Известно, что образование структурных дефектов в виде зон, свободных от выделений (ЗСВ), в той или иной степени характерно для многих псевдо- β -титановых сплавов и оказывает негативное влияние на комплекс механических и эксплуатационных свойств (пластичность, характеристики сопротивления усталости) [15, 16]. Склонность сплавов с однофазной β -структурой к образованию ЗСВ при упрочняющей термической обработке во многом зависит от технологических параметров старения – температуры и времени выдержки [17]. Формирование ЗСВ

обусловлено преимущественно гетерогенным механизмом выделения частиц вторичной α -фазы в условиях замедленного протекания структурно-фазовых превращений в высоколегированных сплавах с рекристаллизованной крупнозернистой β -структурой и малой плотностью дефектов кристаллического строения.

С учетом вышеприведенных особенностей формирования ЗСВ можно ожидать, что достаточно медленное охлаждение с температуры гомогенизации, в процессе которого возможно расслоение β -фазы с выделением β' -фазы, позволит хотя бы частично снизить склонность сплава к образованию ЗСВ и их относительную долю в структуре сплава.

Проведенный анализ особенностей химического состава, структурно-фазовых превращений и технологии термомеханической обработки показал, что на структуру и свойства метастабильных псевдо- β -титановых сплавов при охлаждении с температуры гомогенизации может оказывать влияние достаточно большое количество факторов.

Несмотря на то, что свойством «самозакаливаемости» обладает большинство титановых сплавов данного класса и в закаленном состоянии структура сплава представлена преимущественно β -фазой, последующие процессы старения могут протекать с существенными отличиями как по кинетике структурно-фазовых превращений, так и морфологии выделяющихся структурных составляющих, а также топологии их распределения по объему материала.

Как отмечено в работах по исследованию сплава ВТ47, охлаждение садки с температуры закалки ($>T_{п.п}$) со скоростью не менее $v^{740-400\text{ }^\circ\text{C}}=8-10\text{ }^\circ\text{C/мин}$ позволяет зафиксировать однофазную β -структуру со средним размером зерна $\sim 40\text{ мкм}$ без следов выделения частиц α -фазы [18]. Для данного сплава характерно наличие в структуре незначительного количества частиц оксида иттрия. Однако исследования расслоения метастабильной β -фазы, полноты протекания рекристаллизации и степени влияния скорости охлаждения на свойства сплава ВТ47 после старения до настоящего времени не проводились.

Таким образом, с практической точки зрения исследования, направленные на установление степени влияния скорости охлаждения на свойства и структуру нового псевдо- β -титанового сплава ВТ47 в термически упрочненном состоянии, являются несомненно важными.

В данной статье приведены результаты первичных исследований сплава ВТ47, цель которых – установление влияния скоростей охлаждения, соответствующих диапазону скорости от охлаждения в воде до охлаждения в вакуумной печи, на особенности зарождения частиц вторичной α -фазы, структурно-фазовый состав и твердость при последующем старении.

В вакуумных печах среднего размера (объем рабочего пространства от 50 до 500 л) могут обрабатывать штампованные из листов заготовки и детали небольшого размера в условиях конструкторских бюро и предприятий авиастроительного комплекса. При условии ускоренного охлаждения садки в среде очищенного аргона близкие значения скорости охлаждения могут быть получены и на более крупном технологическом оборудовании с увеличенной массой садки.

В данной работе термическая обработка образцов из сплава ВТ47 проведена по следующим экспериментальным режимам:

1 – закалка при $740\text{ }^\circ\text{C}$, выдержка 40 мин, охлаждение до комнатной температуры с различными скоростями – в воде ($v\approx 7000\text{ }^\circ\text{C/мин}$), на воздухе ($v\approx 600\text{ }^\circ\text{C/мин}$), имитация охлаждения в вакуумных печах Вега-2М ($v^{740-400\text{ }^\circ\text{C}}=17,0\text{ }^\circ\text{C/мин}$) и Вега-8 ($v^{740-400\text{ }^\circ\text{C}}=3,8\text{ }^\circ\text{C/мин}$);

2 – проведены изотермические выдержки (старение) при температуре $560\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 0,5; 2; 8 и 16 ч после каждого из режимов закалки.

Загрузку образцов осуществляли в разогретую до температуры выдержки печь.

Результаты исследования твердости образцов из сплава ВТ47 представлены на рис. 3. Анализ данных показывает, что характер изменения значений твердости от длительности изотермической выдержки не имеет выраженной зависимости от скорости охлаждения при закалке. Небольшие отличия наблюдаются для наиболее низкой скорости охлаждения ($v^{740-400\text{ }^\circ\text{C}}=3,8\text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$) в вакуумной печи Вега-8 и проявляются во всем интервале длительности выдержек и составляют ~ 1 ед., что незначительно превышает погрешность измерения с учетом округления и влияния различных факторов на результат измерений.

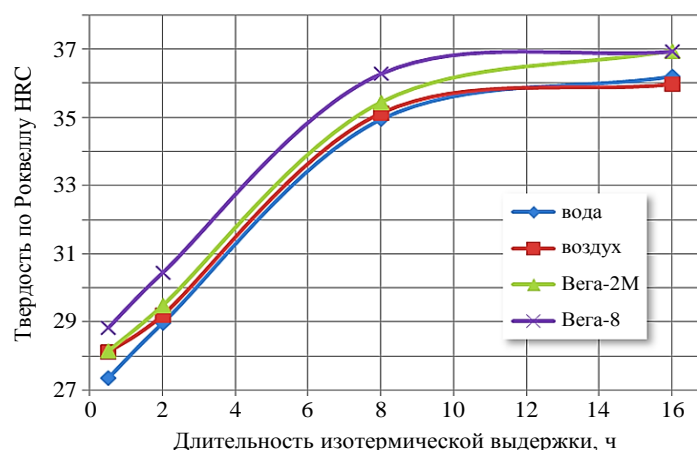


Рис. 3. Средние значения твердости по Роквеллу (HRC) сплава ВТ47 после закалки с различной скоростью охлаждения и последующей изотермической выдержки при $560\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 0,5–16 ч

Металлографические исследования, проведенные методами качественной оптической и растровой электронной микроскопии, также не выявили существенных отличий в типе структуры сплава в зависимости от скорости охлаждения после изотермических выдержек (рис. 4).

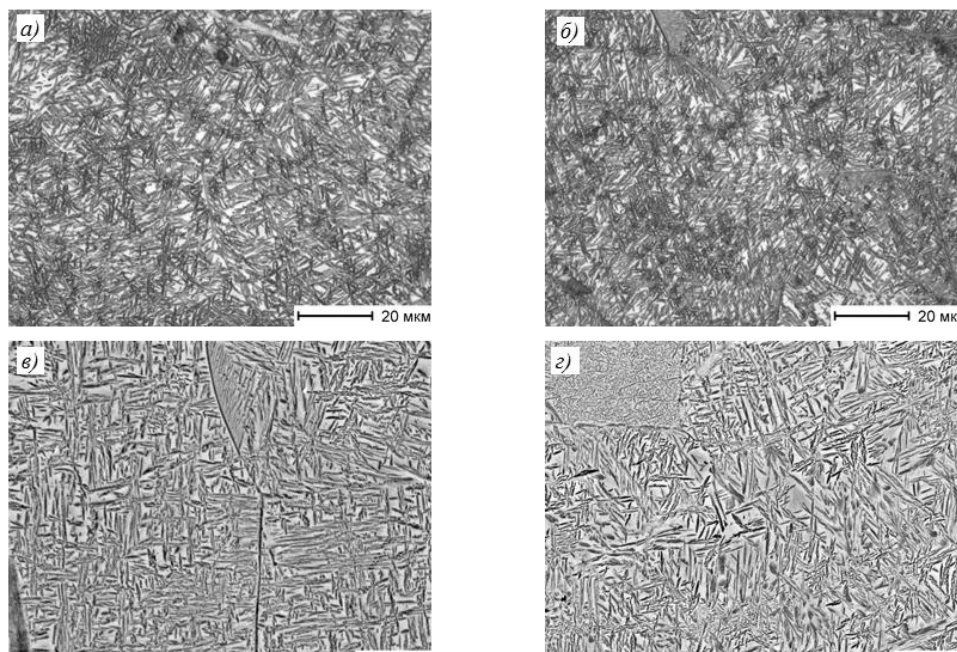


Рис. 4. Микроструктура (а, б – $\times 1000$; в, г – $\times 5000$) сплава ВТ47 после закалки с различной скоростью охлаждения (v) и последующей изотермической выдержки при $560\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 16 ч при охлаждении в воде (а – ОМ; в – РЭМ) и с $v^{740-400\text{ }^\circ\text{C}}=3,8\text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$ (б – ОМ; г – РЭМ)

В структуре экспериментальных образцов при небольшой длительности изотермической выдержки отмечено наличие отдельных зерен или групп зерен с аномально большим количеством выделений вторичной α -фазы (рис. 5).

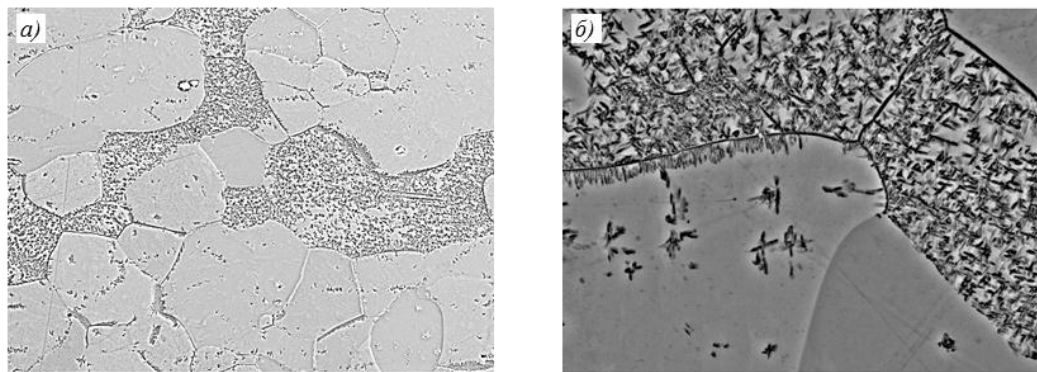


Рис. 5. Микроструктура ($a - \times 1000$; $b - \times 5000$) сплава ВТ47 после закалки и последующей изотермической выдержки при $560\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 2 ч (РЭМ) при охлаждении на воздухе (a) и в воде (b)

После 2 ч изотермической выдержки для полностью рекристаллизованных зерен характерно незначительное количество выделений вторичной α -фазы пластинчатой морфологии в виде «оторочки» по границам исходных β -зерен; выделений пластинчатой морфологии, располагающихся в приграничных объемах и преимущественно направленных перпендикулярно к границам, а также внутризеренных частиц так называемой «звездообразной» морфологии (*widmanstätten star morphology*) [19, 20]. В то время как для зерен, не прошедших полностью процесс рекристаллизации, характерно большое количество внутризеренных выделений вторичной α -фазы.

На промежуточных этапах изотермической выдержки (при 0,5 ч) выявлена некоторая зависимость от скорости охлаждения количества «аномальных» зерен и объемной доли выделений частиц вторичной α -фазы внутри них (рис. 6).

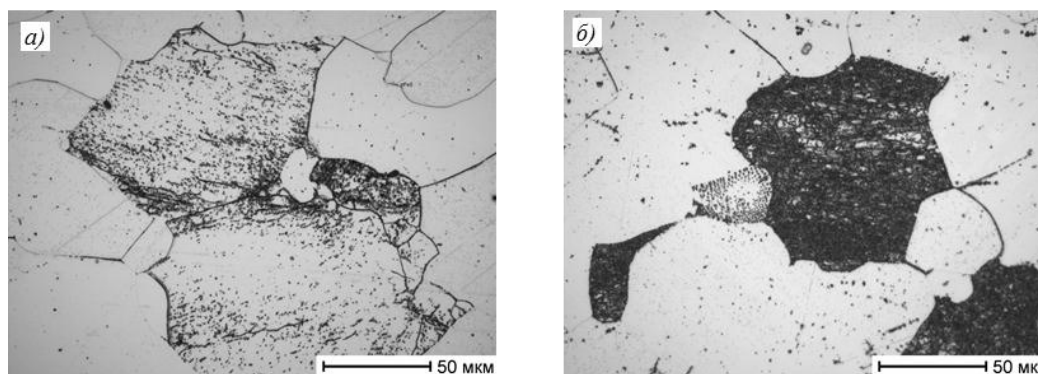


Рис. 6. Микроструктура (ОМ, $\times 500$) сплава ВТ47 после закалки с различной скоростью охлаждения (v) и последующей изотермической выдержки при $560\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 0,5 ч при охлаждении на воздухе (a) и с $v^{740-400\text{ }^{\circ}\text{C}}=3,8\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ (b)

Вероятно, снижение скорости охлаждения за счет более полного развития процесса распада метастабильной β -фазы на фазы β и β' позволяет на начальных этапах дополнительно стимулировать и ускорять протекание структурно-фазовых превращений в не полностью рекристаллизованных зернах. При дальнейшем увеличении длительности

изотермической выдержки скорость охлаждения уже не оказывает существенного влияния на объем вторичных выделений α -фазы в «аномальных» зернах.

Тем не менее для обеспечения повышенной структурной однородности, требуемого уровня механических и эксплуатационных свойств при сохранении технологичности и пластичности необходимо усовершенствование режима гомогенизации, обеспечивающего протекание полной рекристаллизации при сохранении небольшого размера первичного β -зерна.

В результате проведенного анализа данных научно-технических источников и практических исследований нового псевдо- β -титанового сплава ВТ47 следует, что для успешного внедрения нового материала чрезвычайно важными являются научные работы, направленные на углубленный анализ и исследования в области режимов термической обработки, характерных для условий реального производства. Наиболее полное понимание аспектов структурно-фазовых превращений и особенностей их влияния на комплекс технологических, механических и эксплуатационных свойств позволит с высокой точностью и воспроизводимостью управлять свойствами конструкционных материалов.

Заключения

Металлографические исследования показали, что гомогенизация образцов из сплава ВТ47 с последующим охлаждением с различной скоростью и изотермической выдержкой приводит к образованию большого объема частиц α -фазы пластинчатой морфологии, располагающихся как внутри β -зерен, так и вблизи их границ.

По результатам проведенных исследований показано, что сплав ВТ47 является структурно нечувствительным при охлаждении с температуры гомогенизации со скоростью более $v^{740-400\text{ }^\circ\text{C}}=3,8\text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$.

Установлено, что охлаждение сплава ВТ47 после гомогенизации в низкотемпературной β -области в интервале скоростей от «в воду» до $v^{740-400\text{ }^\circ\text{C}}=3,8\text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$ практически не оказывает влияния на значения и характер изменения твердости при последующих изотермических выдержках (старении) при температуре $560\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 0,5–16 ч.

На начальных этапах изотермической выдержки для структуры сплава характерно наличие отдельных зерен или групп зерен с аномально большим количеством выделений вторичной α -фазы.

Библиографический список

1. Titanium and titanium alloys. Fundamentals and applications / ed. by C. Leyens, M. Peters. Wiley–VCH, Germany, 2003. 513 p.
2. Кашапов О.С., Павлова Т.В., Калашников В.С., Кондратьева А.Р. Исследование влияния режимов термической обработки на структуру и свойства опытных поковок из сплава ВТ41 с мелкозернистой структурой // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №3 (48). С. 3–7. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-3-3-7.
3. Kolli R.P., Devaraj A. A review of metastable beta titanium alloys // *Metals*. 2018. Vol. 8. P. 1–41.
4. Скупов А.А., Пантелеев М.Д., Иода Е.Н., Мовенко Д.А. Эффективность применения редкоземельных металлов для легирования присадочных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №3 (48). С. 14–19. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-3-14-19.
5. 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.

6. Каблов Е.Н. Маркетинг материаловедения, авиастроения и промышленности: настоящее и будущее // Директор по маркетингу и сбыту. 2017. №5–6. С. 40–44.
7. Антипов В.В. Перспективы развития алюминиевых, магниевых и титановых сплавов для изделий авиационно-космической техники // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 186–194. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-186-194.
8. Высокопрочный сплав на основе титана и изделие, выполненное из высокопрочного сплава на основе титана: пат. 2569285 Рос. Федерация. №2014153690/02; заявл. 29.12.14; опубл. 20.11.15.
9. Каблов Е.Н., Ночовная Н.А., Грибков Ю.А., Ширяев А.А. Разработка высокопрочного титанового псевдо- β -сплава и технологий получения полуфабрикатов из него // Вопросы материаловедения. 2016. №3 (87). С. 23–31.
10. Azimzadeh S., Rack H.J. Phase transformations in Ti–6,8Mo–4,5Fe–1,5Al // Metallurgical and materials transactions A. 1998. Vol. 29A. P. 2455–2467.
11. Ильин А.А. Механизм и кинетика фазовых и структурных превращений в титановых сплавах. М.: Наука, 1994. 304 с.
12. Chaudhuri K., Perepezko J.H. Microstructural Study of the Titanium Alloy Ti–15Mo–2,7Nb–3Al–0,2Si (TIMETAL 21S) // Metallurgical and materials transactions A. 1994. Vol. 25A. P. 1109–1118.
13. Ivasishin O.M., Markovsky P.E., Semiatin S.L., Ward C.H. Aging response of coarse- and fine-grained β titanium alloys // Materials Science and Engineering A. 2005. Vol. 405. P. 296–305.
14. Furuhashi T. Role of defects on microstructure development of beta titanium alloys // Metal and materials. 2000. Vol. 6. No. 3. P. 221–224.
15. Boyer R.R., Rack H.J., Venkatesh V. The influence of thermomechanical processing on the smooth fatigue properties of Ti–15V–3Cr–3Al–3Sn // Materials Science and Engineering A243. 1998. P. 97–102.
16. Morita T., Yoshimoto T., Maeda T., Matsumoto S. Influence of Hot-Rolling and Aging on Mechanical Properties and Fatigue Strength of Ti–20V–4Al–1Sn Alloy // Ti-2007 Science and Technology. The Japan Institute of Metals, 2007. Vol. 1. P. 555–558.
17. Schmidt P., El-Chaikh A., Christ H.-J. Effect of Duplex Aging on the Initiation and Propagation of Fatigue Cracks in the Solute-rich Metastable β Titanium Alloy Ti 38-644 // Metallurgical and Materials Transactions A. 2011. Vol. 42A. P. 2652–2667.
18. Shiryayev A.A., Nochovnaya N.A. Investigation of structure formation during ageing of high-strength pseudo- β titanium alloy VT47 // Metallurgist. 2020. Vol. 63 (9). P. 967–977. DOI: 10.1007/s11015-020-00914-z.
19. Илларионова С.М., Елкина О.А., Илларионов А.Г. Фазовые превращения в метастабильном β -твердом растворе при термической обработке псевдо- β титанового сплава с РЗМ // Титан. 2016. №3. С. 14–18.
20. Dehghan-Manshadi A., Dippenaar R.J. Development of α -phase morphologies during low temperature isothermal heat treatment of a Ti–5Al–5Mo–5V–3Cr alloy // Materials Science and Engineering A. 2011. Vol. 528. P. 1833–1839.