

УДК 669.295:620.186

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ СТРУКТУРЫ ПОЛУФАБРИКАТОВ ИЗ СПЛАВА ВТ41 НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

О.С. Кашапов, Т.В. Павлова

ВИАМ, Москва, Российская Федерация
e-mail:

Проведено исследование структуры и механических свойств полуфабрикатов — прутков, поковок и штамповок из сплава ВТ41 с различными параметрами глобулярно-пластинчатой микроструктуры. Показано, что механические свойства сплава ВТ41 с глобулярно-пластинчатой микроструктурой определяются не только параметрами структурных составляющих, но и размерами условного β -зерна.

Ключевые слова: псевдо- α титановый сплав, механические свойства, микроструктура, пруток, штамповка.

INFLUENCE OF STRUCTURE PARAMETERS OF SEMI-FINISHED ВТ41 ALLOY PRODUCTS ON MECHANICAL PROPERTIES

O.S. Kashapov, T.V. Pavlova

VIAM, Moscow, Russian Federation
e-mail:

Study of microstructure and mechanical properties of semi-finished products such as bars and forgings of near-alpha titanium alloy ВТ41 with different parameters of microstructure is performed. It was shown that the mechanical properties of the ВТ41 alloy possessing fine grain microstructure are determined not only by the substructure parameters but also by the size of conditional β -grain.

Keywords: near-alpha titanium alloy, mechanical properties, microstructure, bar, forging.

Современные жаропрочные псевдо- α титановые сплавы основаны на принципах сочетания твердорастворного и дисперсионного механизмов упрочнения, наиболее полно реализуемых в полуфабрикатах с глобулярно-пластинчатой микроструктурой. В работах [1–3] описано влияние параметров такой микроструктуры на механические свойства зарубежного жаропрочного псевдо- α титанового сплава IMI 834. В настоящей работе путем анализа структуры и механических свойств различных полуфабрикатов из отечественного псевдо- α сплава ВТ41, полученных из слитка одной плавки, предложено объяснение различия механических свойств материала с разными параметрами микроструктуры. Кроме того, полученные значения характеристик механических свойств будут использованы при квалификации деформированных полуфабрикатов из сплава ВТ41 [4].

Методика проведения исследований. Химический состав промышленного слитка сплава ВТ41 соответствует требованиям ОСТ 1 90013. Для проведения исследования были изготовлены следующие полуфабрикаты: кованный пруток $\varnothing 130$ мм, катаный пруток $\varnothing 22$ мм, штамповка лопатки с толщиной сечения пера 6 мм, поковки $\varnothing 350 \dots 360 \times 22 \dots 25$ мм. Укрупненный технологический процесс изготовления полуфабрикатов в виде схемы приведен на рис. 1.

Термическую обработку всех полуфабрикатов проводили по одному и тому же режиму двойного отжига. Более подробно вопрос о выборе режимов термической обработки сплава ВТ41 с мелкозернистой глобулярно-пластинчатой структурой рассматривался в [5]. Для исключения влияния фактора скорости охлаждения термическую обработку осуществляли на заготовках, вырезанных под образцы, что обеспечило идентичность фазового состава материала.

Микроструктуру исследовали методами оптической и растровой электронной микроскопии (РЭМ) (рис. 2, 3). Для количественного анализа параметров микроструктуры в ряде случаев применяли программное обеспечение Image Expert Pro 3х, а также методику ММ 1.2.135–2011. Для определения механических свойств штамповок



Рис. 1. Технология изготовления полуфабрикатов из сплава ВТ41 (температура полного полиморфного превращения $T_{\text{пп}} = 1022$ °С)

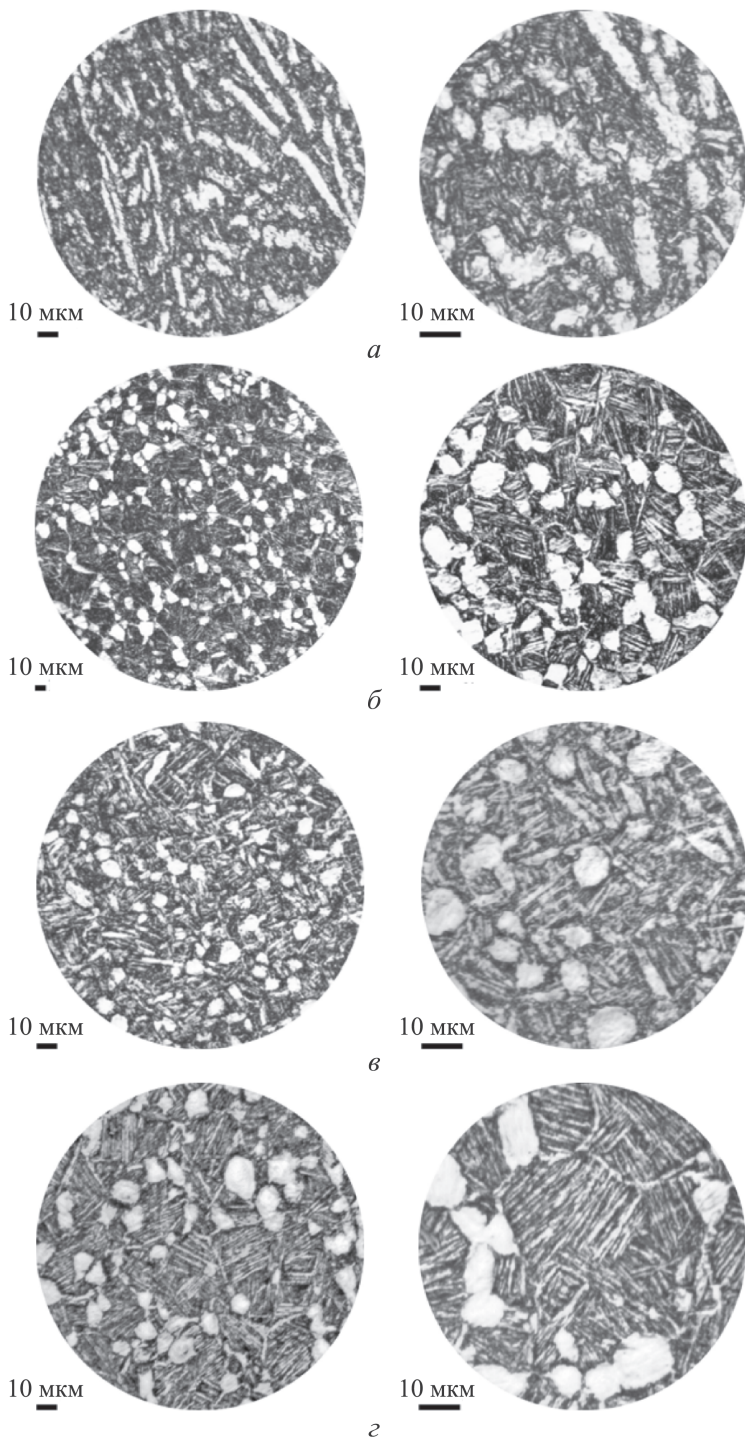


Рис. 2. Микроструктура полуфабрикатов (оптическая микроскопия) в отожженном состоянии:

а — поковка после однократной осадки, радиальное направление; *б* — поковка после всесторонней ковки и осадки, хордовое и радиальное направления; *в* — катаный пруток $\varnothing 22$ мм, поперечное сечение; *г* — штамповка лопатки, продольное сечение

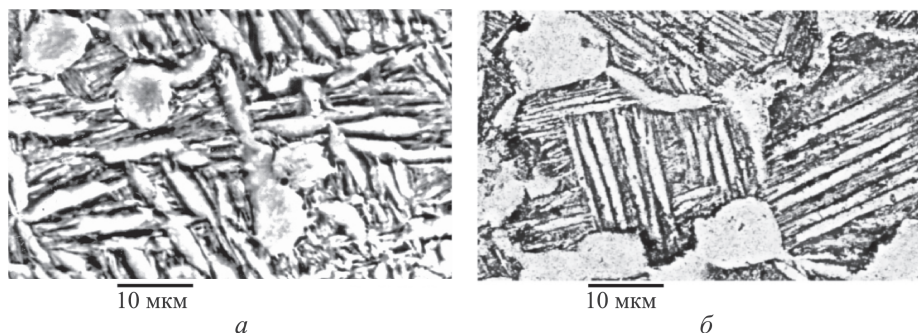


Рис. 3. Микроструктура полуфабрикатов из сплава ВТ41 (РЭМ):

а — пруток $\varnothing 22$ мм; *б* — штамповка после всестороннейковки и осадки в $(\alpha+\beta)$ -области

лопаток изготавливали образцы с диаметром рабочей части $d_0 = 3$ мм и длиной $l_0 = 7$ мм. В остальных случаях использовали стандартные образцы по ГОСТ 1497–84 — для испытаний на растяжение и длительную прочность и образцы типа Менаже по ГОСТ 9454–78.

Результаты исследований. Типичная микроструктура полуфабрикатов из сплава ВТ41, полученная методом оптической микроскопии, приведена на рис. 3.

Как следует из рис. 2, микроструктура всех исследованных полуфабрикатов относится к одному типу (глобулярно-пластинчатому). При недостаточной степени деформации в $(\alpha + \beta)$ -области, процесс сфероидизации частиц первичной α -фазы в полной мере не происходит (рис. 2, *а*). В случае поковки, изготовленной из предварительно деформированной в $(\alpha + \beta)$ -области заготовки, катаного прутка и штамповки лопатки (рис. 2, *б–г*) получение однородной равноосной структуры объясняется стадийностью операций горячей деформации, которая обеспечивает рекристаллизацию α -фазы при нагреве под деформацию на каждой операции и окончательную сфероидизацию при термической обработке.

Детально микроструктуру полуфабрикатов исследовали методом РЭМ (см. рис. 3).

Механические свойства полуфабрикатов приведены в таблице.

Обсуждение. Очевидно различие параметров и морфологии структурных составляющих. При описании микроструктуры в нашем случае целесообразно рассмотреть следующие характеристики: размер условного β -зерна (для равноосной структуры), объемную долю частиц первичной α -фазы, толщину пластин вторичной α -фазы, средний диаметр (толщину) частиц первичной α -фазы. Различие указанных параметров структуры у исследованных полуфабрикатов определяется технологической схемой изготовления, в том числе наследственностью.

Механические свойства полуфабрикатов в отожженном состоянии

Полуфабрикат, направление вырезки	Механические свойства					
	σ_B^{20} , МПа	δ , %	ψ , %	КСУ, Дж/см ²	σ_B^{600} , МПа	σ_{100}^{600} , МПа
1а. Поковка после однократной осадки, радиальное направление	1145–1175	7,2–9,0	14,0–16,0	1,9–2,4	690–725	295
1б. Поковка после однократной осадки, хордовое направление	1085–1110	6,1–8,7	10,3–11,2	—	720–745	—
2а. Поковка после всесторонней ковки и осадки, хордовое и радиальное направления	1100–1135	8,0–10,5	12,5–17,2	2,0–2,35	675–705	295
3. Катаный прут $\varnothing 22$ мм	1005–1030	17,0–21,0	37,0–42,0	1,8–2,2	620–665	275
4. Штамповка лопатки, продольное направление	1015–1055	11,0–15,3	32,1–35,8	—	665–690	—

Для начала рассмотрим влияние морфологии первичной α -фазы на примере поковок, изготовленных по двум технологическим схемам: 1) однократной осадкой и 2) всесторонней ковки с последующей осадкой. В первом случае в продольном сечении полуфабриката микроструктура представлена вытянутыми частицами первичной α -фазы, степень неравноосности (отношение средних значений длины к толщине) которых значительно больше единицы (см. рис. 2, а). Наличие таких частиц приводит к увеличению объемной доли первичной α -фазы в структуре материала с $\approx (21,4 \dots 31,8)$ % для поковок с равноосной структурой до $\approx (23,1 \dots 37,6)$ %. Толщина вытянутых частиц первичной α -фазы в первом случае сравнима со средним диаметром равноосных частиц во втором (см. рис. 2, б). Анизотропия структуры приводит к существенному различию механических свойств ковки в зависимости от ориентации направления вырезки заготовок под образцы. В случае анизотропии микроструктуры при доле (радиальной) ориентации значения кратковременной прочности материала возрастают, а в поперечном — снижаются относительно материала ковки с равноосной микроструктурой. При этом характеристики пластичности снижаются, особенно резко при испытаниях на растяжение образцов с поперечной ориентацией волокна. Вероятно, одной из причин повышения прочности заготовок с анизотропной структурой, вырезанных

в радиальной ориентации, является большая прочность первичной α -фазы по сравнению со вторичной α -фазой (что обусловлено различием химического состава этих фаз) при ее большей объемной доле в структуре материала. Так, исследования химического состава первичной и вторичной α -фаз количественным микрорентгеноспектральным методом на установке JCMA-733 с использованием энергодисперсионного микроанализатора “Inca Energy” показали, что уровень легирования первичной α -фазы для основных легирующих элементов в пересчете на структурный эквивалент по алюминию [6] составляет $[Al]_{eq} = 8,5$; вторичной α -фазы $[Al]_{eq} = 7,2$ при номинальном уровне легирования для исследованной плавки $[Al]_{eq} = 8,0$.

Сильная анизотропия β -зерна приводит к невозможности формирования полноценных колоний пластин вторичной α -фазы в необходимом объеме, что дополнительно сказывается на характеристиках пластичности при испытаниях на растяжение (см. таблицу, строка 1).

Теперь перейдем к сравнению параметров микроструктуры поковки (см. рис. 2, б) и прутка (см. рис. 2, в) с равноосной α -фазой. При примерно одинаковой объемной доле первичной α -фазы (колеблется в пределах от 17,8% до 31,8% в долевом и поперечном сечениях) микроструктура прутка состоит из несколько большего числа частиц первичной α -фазы при их меньшем среднем диаметре. Средняя величина условного β -зерна, измеренная в долевом и поперечном сечениях, для поковки составляет 28,2 мкм, в то время как в прутке — 16,7 мкм. Указанные различия микроструктуры отражаются на механических свойствах. Так, прочностные характеристики прутка, определяемые при растяжении, ниже на $\sim 50 \dots 100$ МПа чем у поковки в зависимости от температуры испытаний (при 20 и 600 °С, см. таблицу). В свою очередь, материал прутка отличается высокой пластичностью при испытаниях на растяжение.

К основным причинам, вызывающим существенное различие по уровню механических свойств в этих полуфабрикатах, можно отнести различие в параметрах микроструктуры, а именно, в размере условного β -зерна. По мнению авторов, он является одним из ключевых параметров, так как по существу определяет морфологию выделения вторичной α -фазы при условии равенства скоростей охлаждения при термической обработке полуфабрикатов. Отчасти с размером и совершенством формы β -зерна связано наличие оторочки α -фазы по границам условного β -зерна (рис. 3, а, б). Материал поковки с более крупнозернистой равноосной структурой и выраженными межзеренными границами имеет более высокую длительную прочность по сравнению с прутком.

Ударная вязкость отожженных полуфабрикатов из сплава ВТ41 с глобулярно-пластинчатой микроструктурой слабо зависит от ее

параметров, а определяется в большей степени фазовым составом. Отметим, что в общем случае на характеристики трещиностойкости сплава ВТ41 оказывает влияние тип микроструктуры (глобулярно-пластинчатая или пластинчатая микроструктура) [9].

Выводы. Исследовано влияние параметров глобулярно-пластинчатой микроструктуры на механические свойства полуфабрикатов из сплава ВТ41. Установлено, что для различных полуфабрикатов из сплава ВТ41 можно получить равноосную структуру с регламентированной объемной долей частиц первичной α -фазы. Показано, что одним из основных факторов, определяющих механические свойства сплава с такой микроструктурой, является размер β -зерна. В свою очередь, на размер β -зерна оказывает влияние технологическая схема изготовления полуфабриката. Экспериментально установлено, что при проведении испытаний на растяжение в определенных случаях рекомендуется регламентировать скорость передвижения захватов испытательной машины.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Sai Srinadh K.V., Singh N., Singh V.* Role of Ti_3Al /silicides on tensile properties of Timetal 834 at various temperatures // Indian Academy of Sciences. Bull. Mater. Sci. December 2007. Vol. 30. No. 6.
2. *Borchert B., Daeubler M.* Influence of microstructure of IMI 834 on mechanical properties relevant to jet engines // Sixth world conference on titanium. 1988. P. 467–472.
3. *Smith D.J.* The isothermal forging of titanium alloys // Sixth world conference on titanium. 1988. P. 1277–1282.
4. *Ерасов В.С., Яковлев Н.О., Нужный Г.А.* Квалификационные испытания и исследования прочности авиационных материалов // Авиационные материалы и технологии: Юбилейный науч.-техн. сб. Приложение. М.: ВИАМ, 2012. С. 440–447.
5. *Кашанов О.С., Павлова Т.В., Ночовная Н.А.* Влияние режимов термической обработки на структуру и свойства жаропрочного титанового сплава для лопаток КВД // Авиационные материалы и технологии. 2010. № 2. С. 8–13.
6. *Ilyin A., Kolachev B., Volodin V., Ryndenkov D.* About the purposefulness of comprasion of titanium alloys in terms of aluminium and Molybdenium equivalents. Titanium 99 // Science and technology. 1999. P. 53–60.
7. *Drozdova N., Elkina O., Popov A., Trubochkin A.* Influence of silicides on the formation of structure and properties of high-temperature titanium based alloys. Titanium 99 // Science and technology. 1999. P. 563–569.
8. *Проходцева Л.В., Филонова Е.В., Наприенко С.А., Мусеева Н.С.* Исследование закономерностей развития процессов разрушения при циклическом нагружении сплава ВТ41 // Авиационные материалы и технологии: Юбилейный науч.-техн. сб. Приложение. М.: ВИАМ, 2012. С. 407–411.
9. *Кашанов О.С., Павлова Т.В., Ночовная Н.А.* Исследование термической стабильности сплава ВТ41 после различной термической обработки // МиТОМ. 2010. № 8. С. 30–34.

REFERENCES

- [1] Sai Srinadh K.V., Singh N., Singh V. Role of Ti_3Al /silicides on tensile properties of Timetal 834 at various temperatures. *Indian Academy of Sciences. Bull. Mater. Sci.* December 2007, vol. 30, no. 6.
- [2] Borchert B., Daeubler M. Influence of microstructure of IMI 834 on mechanical properties relevant to jet engines. *Sixth world conference on titanium.* 1988, pp. 467–472.
- [3] Smith D.J. The isothermal forging of titanium alloys. *Sixth world conference on titanium.* 1988, pp. 1277–1282.
- [4] Erasov V.S., Yakovlev N.O., Nuzhnyy G.A. Qualification tests and research of aviation materials strength. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii. Yubileyny nauch.-tekhn. Sbornik. Prilozhenie* [Aviation Materials and Technologies Anniversary collected articles. Supplement.]. Moscow, VIAM, 2012, pp. 440–447 (in Russ.).
- [5] Kashapov O.S., Pavlova T.V., Nochovnaya N.A. Influence of thermal processing modes on structure and properties of heat-resistant titanium alloy for high-pressure compressor blades. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2010, no. 2, pp. 8–13 (in Russ.).
- [6] Ilyin A., Kolachev B., Volodin V., Ryndenkov D. About the purposefulness of comparison of titanium alloys in terms of aluminium and Molybdenum equivalents – Titanium 99. *Science and technology.* 1999, pp. 53–60.
- [7] Drozdova N., Elkina O., Popov A., Trubochkin A. Influence of silicides on the formation of structure and properties of high-temperature titanium based alloys – Titanium 99. *Science and technology.* 1999, pp. 563–569.
- [8] Prokhodtseva L.V., Filonova E.V., Naprienko S.A., Moiseeva N.S. Study of destruction process development at BT41 alloy cyclic loading. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii. Yubileyny nauch.-tekhn. sb. Prilozhenie* [Aviation Materials and Technologies]. Moscow, VIAM, 2012, pp. 407–411 (in Russ.).
- [9] Kashapov O.S., Pavlova T.V., Nochovnaya N.A. Research of alloy BT41 thermal stability after different types of thermal processing. *Metalloved. i termich. obrabotka metallov* [Metal Science and Heat Treatment], 2010, no. 8, pp. 30–34 (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 10.02.2014

Кашапов Олег Салаватович — канд. техн. наук, начальник сектора Всероссийского научно-исследовательского института авиационных материалов (ВИАМ).
ВИАМ, Российская Федерация, 105005, Москва, ул. Радио, д. 17.

Kashapov O.S. — Cand. Sci. (Eng.), head of department of the All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials (VIAM).
All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials (VIAM), ul. Radio 17, Moscow, 105005 Russian Federation.

Павлова Тамара Васильевна — ведущий инженер Всероссийского научно-исследовательского института авиационных материалов (ВИАМ).
ВИАМ, Российская Федерация, 105005, Москва, ул. Радио, д. 17.

Pavlova T.V. — leading engineer of the All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials (VIAM).
All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials (VIAM), ul. Radio 17, Moscow, 105005 Russian Federation.