

Научная статья

УДК 621.7

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-3-18-29

ИЗУЧЕНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЕФОРМАЦИИ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТИТАНОВОГО СПЛАВА МАРКИ VT30 В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УСЛОВИЙ ДЕФОРМИРОВАНИЯ

М.С. Яшин¹, А.Р. Баженов¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Изучены технологическая пластичность, механизмы деформации и зависимость механических свойств от условий деформирования титанового сплава VT30. Исследованы образцы в литом и ковном состояниях. Образцы осажены на копре и прессе при различных температурах, также проведены ковка и штамповка прутков. Показано, что сплав VT30 обладает лучшими свойствами в ковном состоянии. Определены оптимальные условия для обработки давлением титанового сплава VT30.

Ключевые слова: титан, термообработка, деформация, пластичность, авиационная промышленность, холодная высадка, ковка

Для цитирования: Яшин М.С., Баженов А.Р. Изучение термомеханических параметров деформации и механических свойств титанового сплава марки VT30 в зависимости от условий деформирования // Труды ВИАМ. 2024. № 3 (133). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-3-18-29.

Scientific article

INVESTIGATION OF THERMOMECHANICAL PARAMETERS OF DEFORMATION AND MECHANICAL PROPERTIES DEPENDING ON CONDITIONS OF DEFORMATION OF TITANIUM ALLOY VT30

M.S. Yashin¹, A.R. Bazhenov¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. Technological plasticity, deformation mechanisms and dependence between mechanical properties and the conditions of deformation of titanium alloy VT30 were studied in present work. Samples in cast and forged states were examined. The samples were deformed on a pile driver and press at different temperatures, also forging and stamping were carried out. The results showed that the VT30 alloy has better properties in the forged state. In addition, optimal conditions for pressure treatment of titanium alloy VT30 were obtained.

Keywords: titanium, heat treatment, deformation, plasticity, aviation industry, cooling forming, forging

For citation: Yashin M.S., Bazhenov A.R. Investigation of thermomechanical parameters of deformation and mechanical properties depending on conditions of deformation of titanium alloy VT30. *Trudy VIAM*, 2024, no. 3 (133), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-3-18-29.

Введение

Для развития авиационной техники необходимо промышленное производство деталей из сплавов, которые отвечают повышенным требованиям к прочности, надежности и ресурсу работы [1]. Разработка легированных высокопрочных материалов, в том числе титановых сплавов, предназначенных для аэрокосмической отрасли, является одним из основных направлений деятельности НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ [2, 3].

Современный термообработываемый титановый сплав ВТ30 сочетает способность к холодной деформации с высокой прочностью [4]. Наиболее близким по химическому составу к сплаву ВТ30 является сплав Beta III, разработанный фирмой Crucible Steel Corporation (США). Титановый сплав ВТ30 имеет следующий состав, % (по массе): основа – Ti; 11,5 – Mo; 6,0 – Zr; 4,5 – Sn [5]. Сплав ВТ30 закаливается на β -фазу [6], поэтому обладает более высокой технологической пластичностью в закаленном состоянии при холодной деформации по сравнению с ($\alpha + \beta$)-сплавами [7, 8]. При старении выделяется тонкодисперсная α -фаза [9, 10]. Сплав имеет высокую прочность в сочетании с хорошей пластичностью.

Титановый сплав ВТ30 применяют для изготовления крепежных деталей в авиационной промышленности и деталей из листового материала [5], поскольку в данных случаях с большей эффективностью можно использовать способность сплава к холодной высадке [5, 11] и большой запас прочности [12].

Однако для проведения холодной деформации необходимо формирование определенной (регламентированной) структуры и свойств полуфабрикатов, полученных в результате предварительной горячей деформации.

Исследование технологической пластичности, механизма деформирования и зависимости механических свойств титанового сплава ВТ30 от условий деформации на оборудовании НИЦ «Курчатовский Институт» – ВИАМ является основной целью данной работы. Поведение титанового сплава изучали на образцах в литом и ковном состояниях. Кроме того, исследована деформация сплава при комнатной температуре, поскольку в холодном состоянии он деформируется.

Материалы и методы

Технологическую пластичность сплава ВТ30 исследовали с помощью следующих методов:

- осадка образцов $\varnothing 15$ мм и высотой 20 мм на копре и гидравлическом прессе мощностью 25 т при температурах 700, 750, 800, 900, 1000 и 1100 °С и различной степени деформации как в литом, так и в ковном состояниях [13];
- определение ударной вязкости на копре при температурах 20, 700, 750, 800, 900, 1000 и 1100 °С;
- кратковременное испытание гладких образцов на разрыв при температурах 20, 700, 750, 800, 900, 1000 и 1100 °С;
- определение температуры полиморфного превращения плавки методом металлографического анализа, исследование макроструктуры прутков и металлографическое исследование микроструктуры на головках разрывных образцов. Для определения макро- и микроструктуры образцы подвергали травлению раствором, содержащим 5 % HF и 95 % H₂O;
- определение механических свойств сплава ВТ30 в зависимости от условий горячей деформации. Режимы нагрева под штамповку соответствовали ($\alpha + \beta$)- и β -областям. Штамповку проводили за два перехода. Степень деформации составила 20, 40 и 60 %. Исследования проводили на заготовках в отожженном и закаленном состояниях [14].

Слитки сплава ВТ30 получены методом двойного переплава [15]. Механические свойства сплава в литом состоянии в зависимости от температуры испытаний приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Механические свойства сплава ВТ30 в литом состоянии
в зависимости от температуры испытаний**

Температура испытания, °С	Предел прочности при растяжении, МПа	Относительное удлинение при разрыве, %	Относительное сужение при разрыве, %	Ударная вязкость, Дж/см ²
20	778,12–835,94	24,0	42,0	30,4–37,3
700	171,50–198,94	52,8–60,4	80,5–86,4	122,6–128,4
750	118,58–123,48	80,4	86,0	147,2–189,3
800	69,58–72,52	74,2–89,0	95,8–96,0	149,1–156,9
900	47,04–49,98	99,4–106,0	94,7–96,4	118,7–143,2
1000	27,44–29,40	76,0–127,4	–	93,2–157,9
1100	17,64	90,6	96,0	56,9–60,8

Результаты и обсуждение

Осадку цилиндрических образцов при динамическом деформировании проводили на копре, при статическом – на гидравлическом прессе мощностью 25 т с замером удельного давления.

Осадку образцов под прессом осуществляли в контейнере. Образец закладывали между шайбами со слюдой и вместе с контейнером нагревали в печи.

Критерием допустимой степени деформации является появление первой трещины на поверхности образца. Допустимая степень деформации сплава ВТ30 в литом состоянии приведена в табл. 2.

Таблица 2

Допустимая степень деформации сплава ВТ30 в литом состоянии

Температура испытания, °С	Допустимая степень деформации, %, при осадке	
	на прессе	на копре
700	30	25
750	40	32
800	47	38
900	55	40
1000	49	40
1100	40	30

Механические свойства сплава ВТ30 в ковном состоянии исследовали в интервале температур 20–1100 °С [16]. Результаты испытаний приведены в табл. 3. С повышением температуры характеристики пластичности (относительное сужение и удлинение при разрыве) увеличиваются, а предел прочности уменьшается.

В интервале температур от 20 до 800 °С относительное удлинение после разрыва непрерывно увеличивается и при 800 °С достигает максимального значения (318 %), при температуре >800 °С – уменьшается. Относительное сужение при комнатной температуре составляет 51,5–57,0 %, а в интервале температур 700–1100 °С достигает 96 %. В ходе испытаний при температуре 1000 °С образец изогнулся.

С повышением температуры предел прочности непрерывно уменьшается и при 1100 °С достигает 11,76 МПа.

Таблица 3

**Механические свойства сплава ВТ30 в ковном состоянии
в зависимости от температуры испытаний**

Температура испытания, °С	Предел прочности при растяжении, МПа	Относительное удлинение при разрыве, %	Относительное сужение при разрыве, %	Ударная вязкость, Дж/см ²
20	1073,10–1082,90	9,4–12,4	51,5–57,0	41,2–54,9
700	147,98–201,88	80,8–102,2	94,0–96,0	340,4–367,8
750	108,78–122,50	188,6–198,0	96,0	346,2–367,8
800	102,90–124,46	186,4–318,0	96,0	311,9–338,4
900	17,64–35,28	231,0–318,0	96,0	269,7–279,5
1000	17,64	141,4	96,0	232,4–241,3
1100	11,76	154,0–198,0	96,0	177,5–179,5

В ходе испытаний на ударную вязкость образец сплава в ковном состоянии при температуре 20 °С разрушился, при температурах ≥ 700 °С – сохранился. Значения допустимой деформации сплава в ковном состоянии представлены в табл. 4.

Таблица 4

Допустимая степень деформации сплава ВТ30 в ковном состоянии

Температура испытания, °С	Допустимая степень деформации, %, при осадке	
	на прессе	на копре
700	70	56
750	73	65
800	75	70
900	77	75
1000	79	78
1100	80	80

Сплав ВТ30 в литом состоянии обладает низкой пластичностью. Например, наиболее распространенный ($\alpha + \beta$)-сплав ВТ3-1 допускает деформацию на копре при температуре, близкой к полиморфному превращению ($\epsilon = 60$ %). При более высокой температуре допустимая степень деформации возрастает до 80 %. При деформации на прессе сплав более технологичен. В отличие от сплава ВТ3-1 сплав ВТ30 не допускает деформацию на копре со степенью >40 % практически при всех температурах испытаний.

Осадка образцов на прессе показала, что технологическая пластичность сплава ВТ30 увеличивается, но в меньшей степени, чем для других титановых сплавов. Допустимая степень деформации на прессе за ход оборудования не должна превышать 50 % при температуре 900 °С. Учитывая, что температурный интервал деформации слитка должен быть не менее 200–250 °С, степень деформации должна быть <35 %.

Установлено, что предварительно деформированный материал обладает высокой технологической пластичностью. Допустимая степень деформации возрастает более чем в 2 раза независимо от скорости оборудования.

Допустимая степень деформации в ($\alpha + \beta$)-области сплава ВТ30 в ковном состоянии при осадке на копре выше, чем сплава ВТ3-1. Переход от литого состояния к ковому также увеличивает ударную вязкость при температурах 800–1100 °С в ~ 2 раза.

При деформации на прессе изучали сопротивление деформированию сплава. Определено удельное давление сплава в литом и ковном состояниях (рис. 1). Удельное давление сплава в литом состоянии непрерывно увеличивается при уменьшении

температуры нагрева под деформацию. Так, при температурах 1000–1100 °С удельное давление составляет 127–137 МПа, при 750–800 °С – достигает 196–245 МПа.

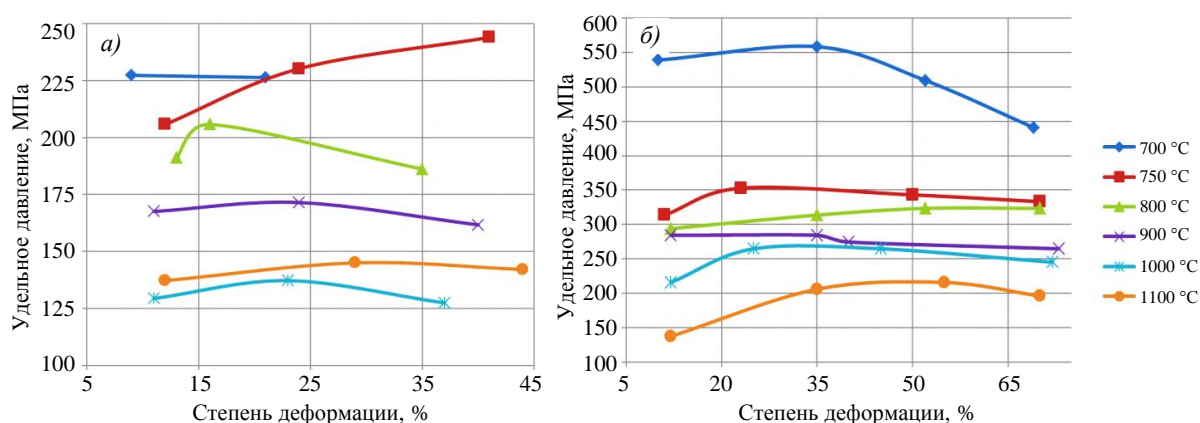


Рис. 1. Удельное давление сплава ВТ30 в литом (а) и ковном (б) состояниях при статическом деформировании на прессе

В ковном состоянии сплав имеет более высокое сопротивление деформации. Например, при температуре 900 °С величина среднего удельного давления сплава в литом состоянии составляет 171 МПа, в ковном – достигает 294 МПа. Значительное упрочнение сплава при деформации в ковном состоянии обнаружено при температуре 700 °С. При снижении температуры с 750 до 700 °С удельное давление возрастает с 313–343 до 539 МПа. Это объясняется тем фактом, что при 700 °С преобладает механизм холодной деформации.

На основании проведенных экспериментов установлено, что деформацию слитка из сплава ВТ30 на молоте следует проводить в интервале температур 800–1100 °С. Степень деформации за удар не должна превышать 25 %. При деформации слитка на прессе интервал температур составляет 750–1100 °С, а степень деформации за ход пресса ≤35 %.

Изучено влияние температуры предварительно деформированного материала на качество полуфабрикатов прутков из сплава ВТ30, а именно на механические свойства, макро- и микроструктуру.

Температура полного полиморфного превращения ($\alpha + \beta \rightleftharpoons \beta$) исследуемой плавки, определенная методом металлографического анализа, составляет 750 ± 10 °С. При температуре 700 °С содержание β -фазы не превышает 3–5 %.

Изучены свойства прутков $\varnothing 30$ мм, кованных при температурах 850 и 950 °С, со степенью деформации 60 % и при штамповке за два перехода при температурах ($\alpha + \beta$)- и β -области, т. е. 750 и 900 °С соответственно (рис. 2) [17]. Исследования проводили как в отожженном, так и в закаленных и состаренных состояниях. Отжиг проводили при температуре ($\alpha + \beta$)-области с охлаждением на воздухе. Закалку осуществляли в ($\alpha + \beta$)-области с охлаждением в воде, после чего выполняли старение при температуре ($\alpha + \beta$)-области с охлаждением на воздухе.

Механические свойства прутков представлены в табл. 5, штампованного пруткового полуфабриката – в табл. 6. Приведенные данные показывают, что всесторонняя деформация (ковка со степенью деформации 65 %) обеспечивает высокий уровень свойств как в отожженных, так и в закаленных и состаренных состояниях даже при нагреве в β -области (т. е. при температурах 850 и 950 °С).



Рис. 2. Пруток из сплава ВТ30

Таблица 5

Механические свойства прутков Ø30 мм из сплава ВТ30 (отожженное, закаленное и состаренное состояние) в зависимости от температуры деформации

Температура нагрева под ковку, °С	Предел прочности при растяжении, МПа	Относительное удлинение при разрыве, %	Относительное сужение при разрыве, %	Ударная вязкость, Дж/см ²	Термообработка
850	886,9	12,7	57,5	–	После горячей деформации
850	1283,8–1332,8	4,7–8,0	25,7–44,7	30,4–36,2	Закалка + старение
850	931,0–940,8	7,7–10,4	57,0–61,5	75,5–80,4	Отжиг
950	1127,0–1146,6	4,9–6,5	39,3–44,6	53,9–74,5	Закалка + старение
950	911,4–931,0	8,4–8,8	51,0–58,0	58,8–76,5	Отжиг
950	–	–	–	97,1–90,2	После горячей деформации

Таблица 6

Механические свойства штампованного пруткового полуфабриката из сплава ВТ30 (отожженное, закаленное и состаренное состояние) в зависимости от температуры деформации

Температура нагрева под штамповку, °С	Степень деформации, %	Предел прочности при растяжении, МПа	Относительное удлинение при разрыве, %	Относительное сужение при разрыве, %	Термообработка
750	40	940,8–970,2	9,4–10,3	56,0–57,0	После горячей деформации
750	40	774,2–867,3	12,1–12,5	60,0–62,0	Отжиг
900	40	965,3–980,0	9,1–9,3	58,5–62,5	
750	20	1313,2–1342,6	7,5–8,7	39,5–45,0	Закалка + старение
	40	1342,6–1347,5	7,1–8,7	33,5–35,5	
	60	1347,5	6,7–8,7	28,7–37,0	
900	20	1293,6–1313,2	4,0	9,7–10,5	
	40	1362,2–1381,8	0,9–3,4	6,1–6,4	
	60	1332,8–1362,2	3,0–3,1	11,1–13,5	

При односторонней деформации на прессе за один ход оборудования уровни свойств пруткового полуфабриката, нагреваемого в $(\alpha + \beta)$ - и β -областях, в отожженном состоянии практически не различаются. В то время как в закаленном и состаренном состояниях относительное сужение полуфабриката, нагреваемого в β -области, в ~ 3 раза меньше, а относительное удлинение в ~ 2 раза меньше по сравнению с данными показателями для полуфабрикатов, полученных после деформации при температурах $(\alpha + \beta)$ -области.

При температуре 950 °С наблюдается разнотернистость (рис. 3, б), что незначительно снижает уровень механических свойств сплава. Для получения относительно мелкозернистой структуры необходимо проводить предварительный нагрев под ковку в β -области при температуре 850 °С с окончанием процесса при 700 °С. Это позволяет получить однородное относительно мелкое рекристаллизованное зерно, что увеличивает прочность сплава.

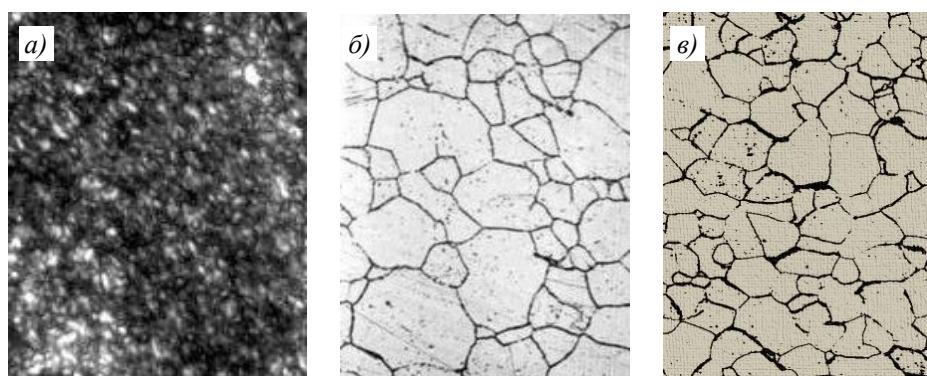


Рис. 3. Структура ($\times 450$) титанового сплава VT30 после старения (а),ковки при температурах 950 (б) и 850 °С (в)

Следует отметить, что уровень пластических свойств как в отожженном, так и в закаленном и состаренном состояниях не возрастает с увеличением степени деформации – колебания не превышают 7 %.

Изучены кинетика роста зерна сплава VT30 (рис. 4) и изменение ударной вязкости в интервале температур 500–1100 °С. Ударная вязкость сплава VT30 зависела от температуры отжига:

Ударная вязкость, Дж/см ²	46,1	73,5	96,1	88,2	90,2	98,1	101,0	76,5	41,2
Температура отжига, °С	500	600	700	800	850	900	950	1000	1100

Установлено, что интенсивный рост микрочастиц начинается при температуре 700 °С, при этом ударная вязкость достигает максимальных значений в диапазоне температур 500–700 °С. В интервале температур 700–950 °С уровень ударной вязкости изменяется незначительно, хотя и сопровождается резким ростом зерен. Снижение ударной вязкости при температуре >950 °С объясняется, по-видимому, значительным окислением образцов и более интенсивным распадом β -фазы.

С учетом того, что сплав будет деформироваться в холодном состоянии, проведено испытание образцов $\varnothing 6$ мм при комнатной температуре на прессе со степенью деформации 25–75 % и более (рис. 5). Трещины выявлены на образцах со степенью деформации 40–50 % и закаленных при различных температурах (рис. 5, з). По-видимому, это связано с интенсивным ростом зерна. В то же время образцы демонстрируют высокую пластичность в исходном и отожженном состоянии со степенью деформации 75 % (рис. 5, б, в).

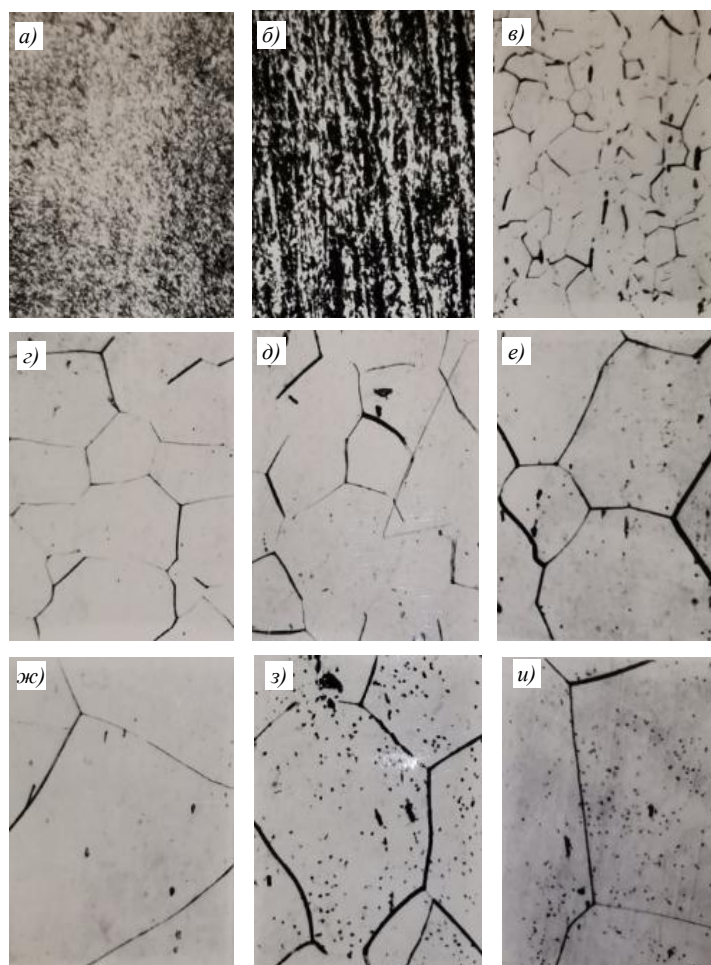


Рис. 4. Микроструктура ($\times 450$) сплава ВТ30 при температурах нагрева 500 (а), 600 (б), 700 (в), 800 (г), 850 (д), 900 (е), 950 (ж), 1000 (з) и 1100 °С (и)

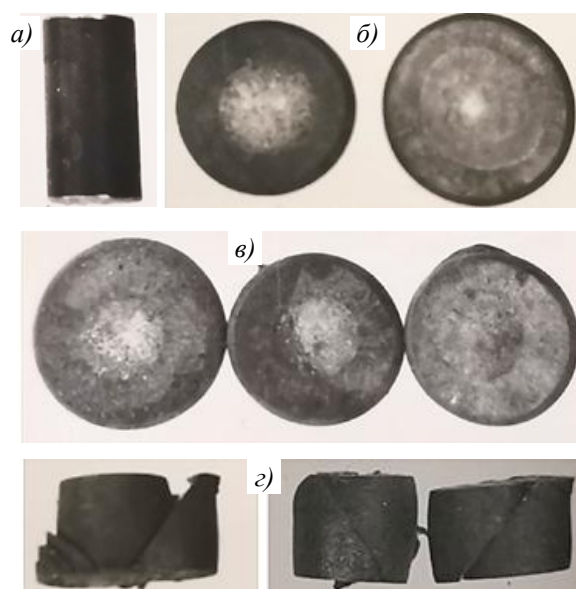


Рис. 5. Образцы сплава ВТ30 до испытания (а), в отожженном (б), горячекованом состоянии (в) при степени деформации 75 % и в закаленном состоянии при степени деформации 50 % (г) после осадки при комнатной температуре

Установлено, что сплав ВТ30 в закаленном состоянии обладает значительно меньшей пластичностью по сравнению с горячекованным и отожженным состоянием при холодной деформации. Согласно техническим условиям, титановый сплав ВТ16, применяемый при холодной высадке, подвергается обработке давлением со степенью деформации $>70\%$. Для сплава ВТ30 это значение достигает 75% , что удовлетворяет требованиям к холодновысадочным крепежам. Кроме того, сплав ВТ16 деформируют в отожженном состоянии. Сплав ВТ30 демонстрирует высокую пластичность как в исходном горячекованном состоянии, так и после отжига. Это значит, что для достижения большей технологичности сплав ВТ30 можно подвергать холодной деформации без предварительной термообработки.

Заключения

Титановый сплав ВТ30 в литом состоянии обладает ограниченной технологической пластичностью как при деформации с большими скоростями на молотах, так и с малыми скоростями на прессах.

Деформацию слитка на молоте следует проводить в интервале температур $800\text{--}1100\text{ }^{\circ}\text{C}$, степень деформации за удар не должна превышать 25% . При деформации слитка на прессе температура должна составлять $750\text{ }^{\circ}\text{C}$, степень деформации за ход пресса $\leq 35\%$.

В предварительно деформированном состоянии сплав обладает высокой технологической пластичностью.

Ковку деформированного материала на предварительные заготовки необходимо проводить на молотах и прессах с температуры $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ в зависимости от усилия оборудования и величины заготовки. Заканчивать ковку на молотах необходимо при температуре $\geq 700\text{ }^{\circ}\text{C}$, на прессах $\geq 600\text{ }^{\circ}\text{C}$. При ковке на окончательный размер температура нагрева должна быть снижена до $850\text{ }^{\circ}\text{C}$, степень деформации $40\text{--}70\%$.

Для получения деформированного полуфабриката в отожженном состоянии оптимальные температуры начала и окончания штамповки на прессах должны составлять 850 и $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, на молотах 900 и $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ соответственно. Для получения пруткового полуфабриката с высоким уровнем свойств в закаленном и состаренном состоянии следует снижать температуру нагрева под штамповку до температуры $(\alpha + \beta)$ -области.

Максимальная технологическая пластичность при последующей холодной деформации титанового сплава ВТ30 достигается при формировании мелкозернистой β -рекристаллизованной структуры после предварительной горячей деформации в β -области или после отжига при температурах, близких к температуре полиморфного превращения.

Список источников

1. 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.
2. Каблов Е.Н., Бакрадзе М.М., Громов В.И., Вознесенская Н.М., Якушева Н.А. Новые высокопрочные конструкционные и коррозионностойкие стали для аэрокосмической техники разработки ФГУП «ВИАМ» (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 1 (58). С. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-3-11.

3. Оспенникова О.Г. Итоги реализации стратегических направлений по созданию нового поколения жаропрочных литейных и деформируемых сплавов и сталей за 2012–2016 гг. // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 17–23. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-17-23.
4. Ночовная Н.А., Ширяев А.А., Шарапкин Д.С. Комплекс механических и эксплуатационных свойств катаных заготовок из псевдо- β -титанового сплава ВТ47 // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 3 (68). Ст. 05. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 16.05.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-50-59.
5. Моисеев В.Н. Бета-титановые сплавы и перспективы их развития // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1998. № 12. С. 11–14.
6. Брун М.Я., Белов С.П., Глазунов С.Г. и др. *Металловедение титановых сплавов*. М.: Металлургия, 1994. 351 с.
7. Каблов Е.Н., Путырский С.В., Яковлев А.Л., Крохина В.А., Наприенко С.А. Исследование сопротивления усталостному разрушению штамповок из высокопрочного титанового сплава ВТ22М, изготовленных с заключительной деформацией в ($\alpha + \beta$)- и β -областях // *Титан*. 2021. Т. 70. № 1. С. 26–33.
8. Зарипова Р.Г., Шундалов В.А., Шарафутдинов А.В. и др. Влияние интенсивной пластической деформации и режимов обработки на структуру и механические свойства титанового сплава ВТ6 // *Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета*. 2012. № 7 (52). С. 17–24.
9. Скугорев А.В., Капитаненко Д.В., Шишков С.Ю., Мельникова Д.А. Формирование структуры и механических свойств высоколегированных титановых сплавов при изотермической штамповке на воздухе // *Титан*. 2021. Т. 72. № 3. С. 34–40.
10. Бургонова О.Ю., Пантюхова К.Н., Белозерова Е.П. Определение рационального режима термической обработки сплава ВТ3-1 для повышения пластичности перед обработкой давлением // *Омский научный вестник*. 2017. № 3 (153). С. 44–48.
11. Разуваев Е.И., Моисеев Н.В., Капитаненко Д.В., Бубнов М.В. Современные технологии обработки металлов давлением // *Труды ВИАМ*. 2015. № 2. Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.05.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-2-3-3.
12. Егорова Ю.Б., Давыденко Л.В., Белова С.Б., Чибисова Е.В. Прогнозирование механических свойств поковок из титановых сплавов ВТ6 и ВТ3-1 в зависимости от химического состава и структуры // *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2018. № 1. С. 12–21.
13. Путырский С.В., Яковлев А.Л., Ночовная Н.А., Крохина В.А. Исследование влияния различных режимов термической обработки на свойства полуфабрикатов и сварных соединений из сплава ВТ22М // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 1 (54). С. 3–10. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-3-10.
14. Дзунович Д.А., Лукина Е.А., Яковлев А.Л. Влияние режимов термической обработки на технологичность и механические свойства листов из высокопрочного титанового сплава ВТ23 // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 3 (52). С. 3–10. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-3-10.
15. Дуюнова В.А., Оглодков М.С., Путырский С.В., Кочетков А.С., Зуева О.В. Современные технологии выплавки слитков титановых сплавов (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 1 (66). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 22.12.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-30-40.
16. Александров В.К., Белов А.Ф., Бондарев Б.И. и др. *Металловедение и обработка титановых и жаропрочных сплавов*. М.: ВИЛС, 1991. 389 с.
17. Крохина В.А., Арисланов А.А., Путырский С.В., Анисимова А.Ю. Исследование закономерностей формирования структуры прутков из титанового сплава ВТ6 в зависимости от различных технологических схем изготовления // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 4 (73). Ст. 04. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 22.12.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-36-44.

References

1. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Kablov E.N., Bakradze M.M., Gromov V.I., Voznesenskaya N.M., Yakusheva N.A. New high strength structural and corrosion-resistant steels for aerospace equipment developed by FSUE «VIAM» (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-3-11.
3. Ospennikova O.G. Implementation results of the strategic directions on creation of new generation of heat-resisting cast and wrought alloys and steels for 2012–2016. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 17–23. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-17-23.
4. Nochovnaya N.A., Shiryaev A.A., Sharapkin D.S. Complex of mechanical and operational properties of rolled blanks from metastable- β -titanium alloy VT47. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 3 (68), paper no. 05. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 16, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-50-59.
5. Moiseev V.N. Beta-titanium alloys and prospects for their development. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov*, 1998, no. 12, pp. 11–14.
6. Brun M.Ya., Belov S.P., Glazunov S.G. et al. *Metallurgy of titanium alloys*. Moscow: Metallurgiya, 1994, 351 p.
7. Kablov E.N., Putyrsky S.V., Yakovlev A.L., Krokhina V.A., Naprienko S.A. Study of resistance to fatigue fracture of forgings made of high-strength titanium alloy VT22M, manufactured with final deformation in the ($\alpha + \beta$)- and β -regions. *Titan*, 2021, vol. 70, no. 1, pp. 26–33.
8. Zaripova R.G., Shundalov V.A., Sharafutdinov A.V. et al. The influence of intense plastic deformation and processing modes on the structure and mechanical properties of titanium alloy VT6. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta*, 2012, no. 7 (52), pp. 17–24.
9. Skugorev A.V., Kapitanenko D.V., Shishkov S.Yu., Melnikova D.A. Formation of the structure and mechanical properties of high-alloy titanium alloys during isothermal stamping in air. *Titan*, 2021, vol. 72, no. 3, pp. 34–40.
10. Burgonova O.Yu., Pantyukhova K.N., Belozerova E.P. Determination of a rational mode of heat treatment of the VT3-1 alloy to increase ductility before pressure treatment. *Omskiy nauchnyy vestnik*, 2017, no. 3 (153), pp. 44–48.
11. Razyvaev E.I., Moiseev N.V., Kapitanenko D.V., Bubnov M.V. Modern technologies of plastic working of metals. *Trudy VIAM*, 2015, no. 2, paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 12, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-2-3-3.
12. Egorova Yu.B., Davydenko L.V., Belova S.B., Chibisova E.V. Prediction of mechanical properties of forgings from titanium alloys VT6 and VT3-1 depending on the chemical composition and structure. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya*, 2018, no. 1, pp. 12–21.
13. Putyrskiy S.V., Yakovlev A.L., Nochovnaya N.A., Krokhina V.A. Research of different heat treatment modes influence on properties of semi-finished products and welded joints from titanium alloy BT22M. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 1 (54), pp. 3–10. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-3-10.
14. Dzunovich D.A., Lukina E.A., Yakovlev A.L. Influence of heat treatment parameters on producibility and mechanical properties of sheets made from high-strength titanium alloy VT23. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 3 (52), pp. 3–10. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-3-10.
15. Duyunova V.A., Oglodkov M.S., Putyrskiy S.V., Kochetkov A.S., Zueva O.V. Modern technologies for melting titanium alloy ingots (review). *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 1 (66), paper no. 03. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 22, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-30-40.

16. Aleksandrov V.K., Belov A.F., Bondarev B.I. et al. *Metallurgy and processing of titanium and heat-resistant alloys*. Moscow: VILS, 1991, 389 p.
17. Krokhnina V.A., Arislanov A.A., Putyrskiy S.V., Anisimova A.Yu. Investigation of the regularities of the formation of the structure of rods made of titanium alloy VT6 depending on various technological schemes of manufacture. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 4 (73), paper no. 04. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 22, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-36-44.

Информация об авторах

Яшин Максим Сергеевич, ведущий инженер, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Баженов Александр Романович, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Maxim S. Yashin, Leading Engineer, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alexander R. Bazhenov, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 24.01.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 06.02.2024.
The article was submitted 24.01.2024; approved and accepted for publication after reviewing 06.02.2024.