

Научная статья

УДК 669.018.292:669.295

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-3-23-32

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГОРЯЧЕЙ И ТЕПЛОЙ ПРОКАТКИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ТИПА VT23

М.С. Яшин¹, Д.В. Капитаненко¹

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

Аннотация. Проведено исследование особенностей технологии прокатки листов из высокопрочного титанового сплава типа VT23 в условиях НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ. Для отработки режимов прокатки сплава применяли компьютерное моделирование в специальном программном комплексе. Образцы из сплава типа VT23 подвергали прокатке при различной температуре, в результате получены оптимальные режимы горячей и теплой обработки давлением. Проанализированы механические свойства и структура полученных листов, которые удовлетворяют требуемым значениям.

Ключевые слова: титан, термообработка, деформация, пластичность, авиационная промышленность, прокатка, микроструктура

Для цитирования: Яшин М.С., Капитаненко Д.В. Исследование термомеханических параметров горячей и теплой прокатки титанового сплава типа VT23 // Труды ВИАМ. 2025. № 3 (145). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-3-23-32.

Scientific article

INVESTIGATION OF THERMO-MECHANICAL PARAMETERS OF HOT AND WARM ROLLING OF TITANIUM ALLOY VT23 TYPE

M.S. Yashin¹, D.V. Kapitanenko¹

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

Abstract. In present work the study of technology particularities of high-strength titanium alloy rolling sheets VT23 under conditions of the National Research Center «Kurchatov Institute» – VIAM. Computer modeling in a special software package was used to develop the alloy rolling regimes. Samples of the VT23 alloy were rolled at different temperatures, as a result, optimal regimes of hot and warm pressure treatment were obtained. The mechanical properties and structure of the obtained sheets were analyzed, which satisfy the required values.

Keywords: titanium, heat treatment, deformation, plasticity, aviation industry, rolling, microstructure

For citation: Yashin M.S., Kapitanenko D.V. Investigation of thermo-mechanical parameters of hot and warm rolling of titanium alloy VT23 type. *Trudy VIAM*, 2025, no. 3 (145), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-3-23-32.

Введение

Термически упрочняемые титановые сплавы получили широкое распространение в различных отраслях машиностроения [1]. В отечественной промышленности освоено производство термически упрочняемых титановых сплавов типа BT6, BT14, BT15 и других с большим пределом прочности в отожженном состоянии [2, 3]. Однако в связи с развитием техники и увеличивающимся спросом на продукцию из титановых сплавов возникла потребность в освоении технологий изготовления полуфабрикатов, которые по удельной прочности могут конкурировать с полуфабрикатами из высокопрочных сталей и алюминиевых сплавов [4].

Одним из таких сплавов является сплав типа BT23 – многокомпонентный сплав системы Ti–Al–Mo–V–Cr–Fe, который относится к двухфазным термически упрочняемым ($\alpha + \beta$)-сплавам мартенситного типа. Температура превращения ($\alpha + \beta$) $\leftrightarrow \beta$ составляет 900–930 °C [5]. По своему фазовому составу сплав типа BT23 близок к сплаву типа BT14. Отличие сплава типа BT23 от сплава типа BT22 состоит в меньшей степени легирования молибденом (1,5–2,5 вместо 4,0–5,5 %) [6], что придает ему некоторые более выгодные технологические и механические свойства. Химический состав сплава типа BT23 следующий [7], % (по массе):

Ti	Fe	Cr	Mo	V	Al
84,0–89,3	0,4–0,8	0,8–1,4	1,5–2,5	4,0–5,0	4,0–6,3

Однако сплав типа BT23, как и другие титановые сплавы, чувствителен к перегреву [8]. Его нагрев выше температуры полиморфного превращения приводит к интенсивному росту зерен [9] и огрублению структуры [10], что снижает характеристики пластичности. Механические свойства сплава представлены в таблице.

Свойства сплава типа BT23 [7]

Состояние	σ_b , МПа	δ_5 , %
Отожженное	~(1100–1200)	10–13
Термоупрочненное	~(1450–1600)	4–6

Сплав хорошо сваривается всеми видами сварки, сварные соединения сплава характеризуются высокой прочностью. В научно-технической литературе рекомендуются следующие режимы термической обработки сплава типа BT23: отжиг при температуре нагрева 750 °C, охлаждение на воздухе; термоупрочняющая обработка – закалка при температуре 780–800 °C, охлаждение в воде и старение при 450–520 °C с охлаждением на воздухе [11].

Цель данной работы – определение термомеханических параметров прокатки листов из сплава типа BT23 толщиной 2 мм и разработка технологии прокатки в условиях НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, а также определение уровня механических свойств листов в отожженном и упрочненном состоянии [12].

Материалы и методы

Исследования параметров и режимов горячей прокатки сплава типа BT23 проводили на образцах толщиной 12 мм. Образцы получали из опытных слитков, изготовленных методом двойной электронно-лучевой выплавки [13]. Для анализа возможности

осуществления прокатки титанового сплава в условиях НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ использовали специализированный программный комплекс [14], с помощью которого производили компьютерное моделирование для определения усилий прокатки и расчета размеров полученных полуфабрикатов [15].

Образцы под прокатку нагревали в камерной электропечи с максимальной рабочей температурой 1250 °С. Для компенсации потери тепла образцов при переносе их от печи к прокатному стану температуру печи устанавливали на 20 °С выше температуры прокатки. Образцы загружали в печь в садках по 12 шт. и устанавливали на ребро с зазором для обеспечения лучшего прогрева. При прокатке за несколько проходов образцов из садки одного нагрева происходят большие тепловые потери, поэтому для их компенсации прокатываемые образцы после каждого прохода подогревали в печи в течение 10–15 мин до температуры на 20–30 °С ниже температуры предыдущей прокатки.

Исследование параметров горячей прокатки проводили на стане для горячей прокатки. Диаметр валков составлял 450 мм, длина 900 мм при скорости прокатки 0,4 м/с. Определение силовых параметров прокатки производили при температурах выше и ниже температуры фазового превращения. Образцы прокатывали с обжатием 15 % за проход при всех температурах и с обжатием 30 % за проход при температурах горячей прокатки. Кроме того, для оценки деформируемости сплава при температурах горячей прокатки образцы прокатывали с обжатием 45 % за один проход.

Для определения влияния различных температурно-деформационных режимов прокатки на механические свойства сплава типа ВТ23 проводили горячую прокатку образцов толщиной 12 мм до толщины 4,5 мм за 3–4 прохода с обжатием 15–30 % за проход по двум температурным режимам: в диапазоне горячей и теплой прокатки. Горячекатаные образцы толщиной 4,5 мм после травления подвергали тепловой прокатке при температурах ниже температуры полиморфного превращения до толщины 2 мм за 4–7 проходов с обжатием 6–20 % за проход.

Испытания образцов на определение относительного удлинения и кратковременной прочности осуществляли по ГОСТ 9651–84 и ГОСТ 1497–84. Структуру полученного полуфабриката изучали на микроскопе при увеличении $\times 300$. Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Результаты и обсуждение

Компьютерное моделирование процессов прокатки

Компьютерное моделирование процессов прокатки листов из сплава типа ВТ23 проводили с целью отработки режимов прокатки сплава. В специализированном программном комплексе выполнены расчеты с помощью метода конечных элементов. Оценивали как форму и температуру заготовки, так и усилие деформации. Результаты компьютерного моделирования представлены на рис. 1. Видно, что при моделировании горячей прокатки (рис. 1, а–в) температура снижается с 1000–900 до 800–700 °С, а усилие возрастает в ~ 10 раз. Это может быть связано с уменьшением толщины заготовки и ее остыванием. После подогрева до температуры теплой прокатки (рис. 1, г–е) усилия снижаются до $\sim (5–6)$ МН и сохраняются на протяжении всех переходов прокатки.

На рис. 2 показан результат моделирования теплой прокатки. Видно, что сечение заготовки соответствует требуемым размерам с незначительными отклонениями.

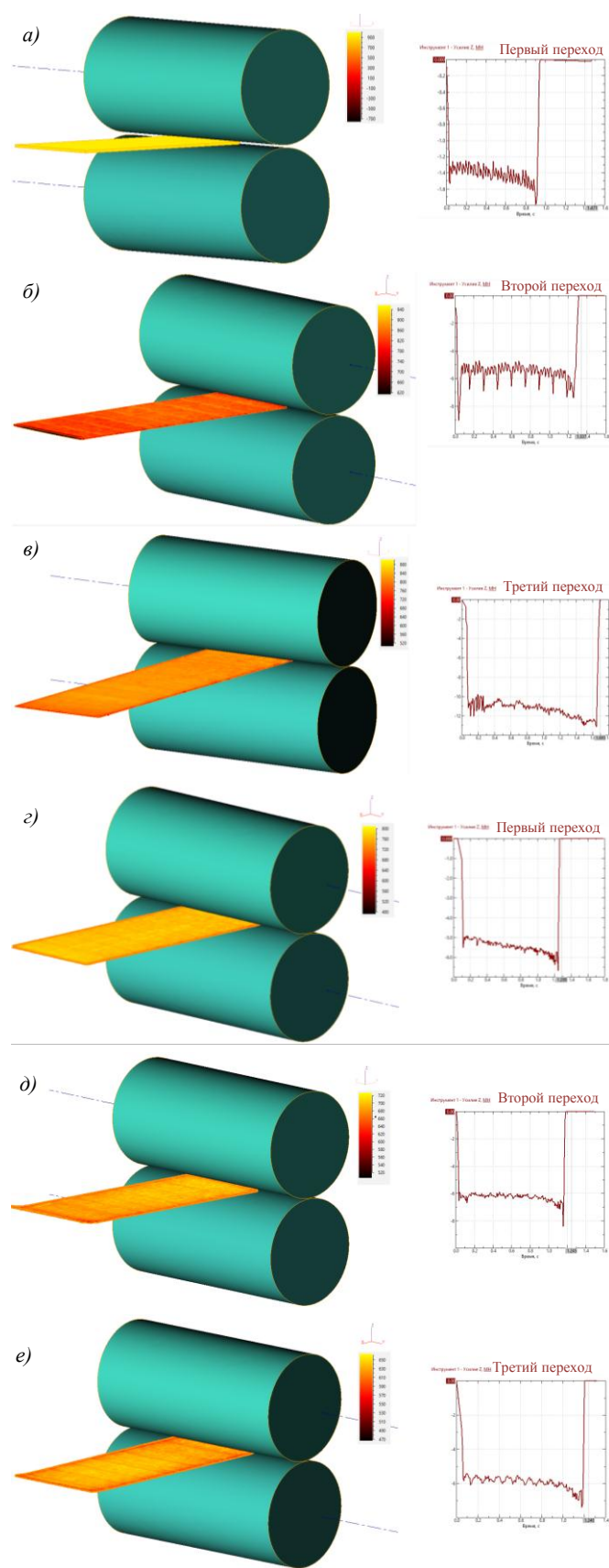


Рис. 1. Результаты компьютерного моделирования для листов из сплава типа ВТ23: распределение температурных полей и графики силы при горячей (а–б) и теплой прокатках (г–е)

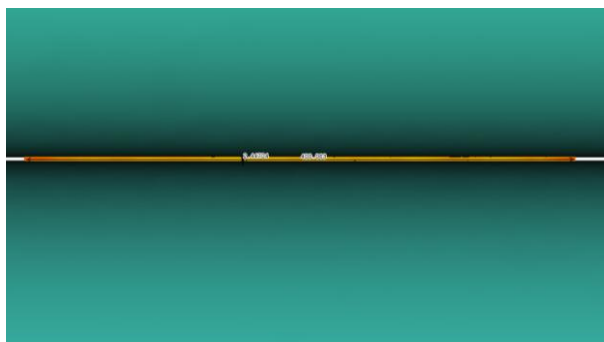


Рис. 2. Сечение полученного листа из сплава типа VT23 после теплой прокатки

Анализ результатов компьютерного моделирования в специальном программном комплексе позволяет сделать вывод о сходимости полученной модели деформации с экспериментальными данными, полученными в процессе прокатки листов.

Зависимость силовых параметров прокатки от температуры и степени деформации

Указанные зависимости определяли при прокатке образцов в диапазоне температур выше и ниже температуры полиморфного превращения с обжатием 15 и 30 % за проход с замером полного давления металла на валки. В данной работе изучено изменение средних удельных давлений в зависимости от температуры при деформации сплава типа VT23 на 15 и 30 %. Значения удельных давлений с уменьшением температуры возрастают со 100–150 до 950–1000 МПа.

Эти изменения соответствуют фазовому состоянию сплава. Резкое снижение значений удельных давлений начинается с температуры на 300 °С ниже температуры полиморфного превращения, а при температуре на 100 °С ниже превращения $(\alpha + \beta) \leftrightarrow \beta$ сплав типа VT23 достаточно разупрочняется и удельные давления при обжатии 30 % составляют 200–280 МПа и 150–250 МПа – при обжатии 15 %.

Степень деформации оказывает меньшее влияние на силовые параметры прокатки, чем температура. Так, понижение температуры прокатки на 100 °С в интервале существования $(\alpha + \beta)$ -фазы сопровождается повышением удельного давления на 240–300 МПа, а увеличение деформации с 15 до 30 % вызывает повышение удельного давления не более чем на 50–100 МПа.

Деформируемость сплава типа VT23 в горячем состоянии высокая. При прокатке контрольных образцов в диапазоне температур выше и ниже температуры полиморфного превращения с обжатием 45 % за проход появления трещин не наблюдалось. При горячей прокатке образцов толщиной 12 мм в этом диапазоне температур удельные давления изменялись в пределах 235–520 МПа. При теплой прокатке образцов толщиной 4,5 мм с обжатием 15 % в интервале температур ниже температуры полиморфного превращения удельные давления изменялись в пределах 290–460 МПа.

Характер изменения крутящих моментов в зависимости от температуры и степени деформации согласуется с характером изменения удельных и полных давлений. Абсолютные значения крутящих моментов в основном пропорциональны полному давлению металла на валки.

Зависимость силовых параметров прокатки от геометрических факторов

Известно, что геометрические факторы (такие как толщина и ширина полосы, диаметр валков и величина обжатия) оказывают влияние на силовые параметры прокатки. С изменением геометрических факторов изменяются условия напряженно-деформированного состояния в очаге деформации и, следовательно, силовые параметры прокатки.

Для определения влияния геометрических факторов на удельное давление и крутящий момент образцы толщиной 12 и 4,5 мм прокатывали с обжатием 15 % при температурах, применяемых при исследовании.

Ширина образцов выбиралась из условия, что при отношении ширины к высоте ≥ 5 она не оказывает существенного влияния на удельное давление. В данной работе изучено изменение удельных давлений в зависимости от температуры и толщины полосы при прокатке с обжатием 15 %. При исследовании выяснилось, что с уменьшением толщины прокатываемой полосы (при прочих равных условиях) удельные давления интенсивно растут, особенно в области низких температур.

Так, при прокатке образцов толщиной 12 и 4,5 мм с обжатием 15 % при температуре на 100 °С ниже температуры полиморфного превращения средние удельные давления составили 245 и 440 МПа соответственно, т. е. при уменьшении толщины полосы в 2,5–2,7 раза удельные давления увеличились в 2 раза. С уменьшением температуры значение средних удельных давлений возрастает со 100–200 до 1000–1200 МПа.

Интенсивный рост удельного давления с уменьшением толщины полосы можно объяснить влиянием следующих факторов:

- увеличением отношения площади контактных поверхностей к объему металла, находящегося в очаге деформации, и, как следствие, более сильным проявлением сил контактного трения;
- усугублением объемного напряженного состояния вследствие большого затруднения поперечной деформации;
- более интенсивным подхлаживанием полосы валками при горячей деформации.

Однако силовые параметры прокатки зависят не только от толщины полосы, но и от диаметра валков. С увеличением диаметра валков возрастает протяженность очага деформации и усугубляются условия напряженно-деформированного состояния, в большей степени проявляются силы контактного трения. Совместное влияние на силовые параметры прокатки толщины полосы h и диаметра валков d принято выражать отношением h/d , которое является наиболее характерным показателем зависимости силовых параметров прокатки от геометрических факторов.

Для построения этих зависимостей прокатке подвергали образцы толщиной от 12 до 2 мм. При этом отношение h/d изменялось в пределах от 0,012 до 0,002.

Изучение изменения средних удельных давлений в зависимости от отношения h/d при обжатии 30 и 15 % показало, что с уменьшением отношения h/d в 4 раза средние удельные давления возрастают в $\sim(1,5-2)$ раза как при горячей, так и при теплой прокатке.

Зависимость коэффициента трения от температуры

Известно, что реальные значения коэффициента трения получают только при плоской прокатке, когда отсутствует неравномерность высотной деформации, что обеспечивается при отношении длины и высоты не менее 2,5. Поэтому в данной работе коэффициент трения определяли только при прокатке образцов толщиной 4,5 мм с относительным обжатием 15 % в диапазоне температур от температуры полиморфного превращения до температуры на 400 °С ниже этой температуры.

В области существования $(\alpha + \beta)$ -фаз с повышением температуры коэффициент трения несколько возрастает – с 0,15–0,2 при температуре на 400 °С ниже температуры полиморфного превращения до 0,3 при температуре на 200 °С ниже этой температуры, а затем при дальнейшем нагреве наблюдается его снижение.

Некоторый рост коэффициента трения, который наблюдался при температуре на 200 °С ниже температуры полиморфного превращения, можно объяснить образованием окалины, которая ухудшает скольжение. Существенное снижение значений коэффициента трения при температуре, близкой к температуре полиморфного превращения, объясняется резким разупрочнением сплава и снижением значений удельных давлений.

При прокатке полос толщиной 4,5 мм в диапазоне температур от температуры полиморфного превращения до температуры на 400 °С ниже коэффициент трения изменяется в пределах 0,1–0,32.

Исследование влияния различных температурно-деформационных режимов прокатки на структуру и свойства сплава типа VT23

Для получения тонких листов из сплава типа VT23 производили предварительную горячую прокатку с окончанием деформации в β -области и последующей теплой прокаткой. После обработки тонких листов давлением проводили их упрочняющий отжиг.

Влияние температурно-деформационных режимов горячей прокатки на структуру и свойства горячекатаных листов определяли после прокатки в диапазоне температур выше и ниже температуры полиморфного превращения на образцах с толщины 12 мм до толщины 4,5 мм и с относительным обжатием 15 и 30 %.

Структуру и свойства теплокатаных листов исследовали на образцах толщиной 2 мм, прокатанных с толщины 4,5 мм по четырем режимам ниже температуры полиморфного превращения.

В данной работе исследовали зависимости механических свойств от температуры прокатки образцов, прокатанных с толщины 12 мм за один проход со степенями деформации 15 и 30 %. При прокатке при температуре на 200 °С ниже температуры полиморфного превращения механические свойства образцов характеризуются более высокими значениями пластичности, относительного удлинения и сужения и меньшей прочностью, по сравнению с прокаткой при более высоких и низких температурах. Прокатка при температуре на 400 °С ниже температуры превращения ($\alpha + \beta$) $\leftrightarrow$ β привела к резкому снижению прочности и пластичности. С повышением температуры на 100 °С выше температуры полиморфного превращения наблюдается незначительный рост прочности при одновременном снижении пластичности.

Исследование микроструктуры показало, что после предварительной горячей прокатки при температуре полиморфного превращения и при температуре на 100 °С выше этой температуры образцы имеют пластинчатую ($\alpha + \beta$)-структуру (рис. 3, а). После теплой прокатки при температуре на 100–200 °С ниже температуры превращения ($\alpha + \beta$) $\leftrightarrow$ β на изученной структуре продемонстрированы β -зерна с зернограничной α -фазой и внутризеренной пластинчатой α -фазой (рис. 3, б).

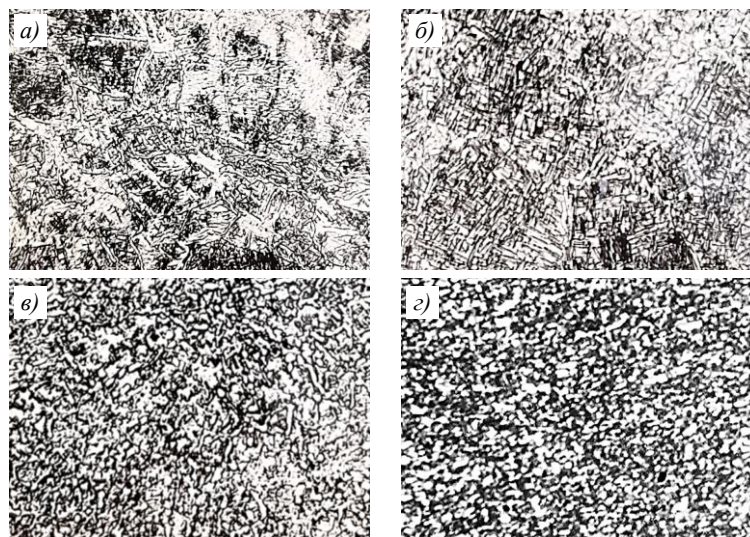


Рис. 3. Микроструктуры листов сплава типа VT23: а – после горячей прокатки с окончанием деформации в β -области; б – после теплой прокатки; в – после упрочняющей термической обработки; з – после прокатки за два перехода и с поворотом на 90 градусов с последующей термической обработкой

В результате механических испытаний образцов толщиной 2 мм получено, что в исходном теплокатаном состоянии листовые образцы имели прочность $\sigma_b = 1010\text{--}1205$ МПа при относительном удлинении 11,3–5,1 %. Отжиг приводит к повышению показателей пластичности образцов, прокатанных при температуре, близкой к температурам полиморфного превращения. Анализ механических свойств листовых образцов показал, что температура горячей прокатки должна быть не выше температуры превращения $(\alpha + \beta) \leftrightarrow \beta$, а температура теплой прокатки – на 200–300 °С меньше.

Для получения оптимальных свойств проводили упрочняющую термообработку листов. Образцы, подвергавшиеся теплой прокатке с обжатию 50 %, на первом этапе проходили закалку при температуре на ~200 °С ниже температуры полиморфного превращения с последующим старением при температуре на ~500 °С ниже температуры превращения $(\alpha + \beta) \leftrightarrow \beta$. Полученную структуру можно наблюдать на рис. 3, в – на изображении видно, что происходит глобуляризация α -фазы, однако наблюдается и остаточная зернограницная α -фаза.

Из полученного после прокатки и упрочняющей термообработки листа вырезали два образца: в продольном и поперечном направлениях. Испытания образцов на прочность показали, что в продольном направлении $\sigma_b = 1395$ МПа, а в поперечном – $\sigma_b = 1210$ МПа. Эту разницу можно объяснить присутствием остаточной зернограницной α -фазы.

Для того чтобы получить мелкозернистую равноосную структуру, необходимо произвести теплую прокатку с обжатию 30 % с последующим подогревом и повторной прокаткой с обжатию 30 % с изменением направления прокатки на 90 градусов и подвергнуть полученные листы термообработке по режиму закалки и старения. На рис. 3, г показана полученная глобулярная структура – мелкозернистая и однородная. Значение σ_b во всех направлениях составило ~1420 МПа, а относительное удлинение равно 6 %.

Заключения

На оборудовании НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в широком диапазоне температур и степеней деформации изучены термомеханические параметры прокатки листов толщиной 2 мм из высокопрочного титанового сплава типа ВТ23.

Установлено, что характер изменения удельных давлений в зависимости от температуры прокатки связан с фазовым состоянием сплава. Степень деформации при горячей прокатке оказывает незначительное влияние на удельное давление. При горячей прокатке образцов толщиной 12 мм при температурах, близких к температуре полиморфного превращения, с обжатию 30 % удельные давления составляли ~(150–500) МПа. При теплой прокатке образцов толщиной 4,5 мм при температурах ниже температуры полиморфного превращения с обжатию 15 % удельные давления составляли ~(440–1200) МПа.

Изучена зависимость силовых параметров прокатки от геометрических факторов. Установлено, что с уменьшением толщины полосы в 2,5–2,7 раза удельные давления возрастают в 1,5–2 раза, с уменьшением отношения ширины полосы к диаметру валков в 4 раза удельные давления возрастают в 1,6–2 раза.

Определена деформируемость сплава типа ВТ23 при прокатке при температурах от ~100 °С выше температуры полиморфного превращения до 400 °С ниже этой температуры. Установлено, что сплав обладает достаточно высокой деформируемостью во всем диапазоне исследуемых температур.

Изучена температурная зависимость коэффициента трения при прокатке сплава типа ВТ23. Установлено, что в области существования $(\alpha + \beta)$ -фаз коэффициент трения возрастает с 0,15 до 0,2 при температуре на 400 °С ниже температуры полиморфного превращения и до 0,3–0,32 при температуре на 200 °С ниже этой температуры. При более высоких температурах коэффициент трения снижается вследствие резкого разупрочнения металла.

Изучено влияние различных температурно-деформационных режимов горячей и теплой прокатки на структуру и свойства сплава типа ВТ23. Установлено, что оптимальные механические свойства горячекатаных листов достигаются при прокатке в интервале от температуры полиморфного превращения до температуры на 200 °С ниже этой температуры с относительным обжатием 15–30 %. Оптимальные механические свойства теплокатаных листов достигаются при прокатке на 200–300 °С ниже температуры превращения $(\alpha + \beta) \leftrightarrow \beta$. При прокатке листа за два перехода с поворотом на 90 градусов получаются более мелкозернистая глобулярная структура и однородные свойства во всех направлениях – $\sigma_b = 1420$ МПа и $\delta = 6$ %.

Список источников

1. Моисеев В.Н. Бета-титановые сплавы и перспективы их развития // Металловедение и термическая обработка металлов. 1998. № 12. С. 11–14.
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. 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: 17.09.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-50-59.
4. 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: 10.18577/2071-91.
5. Хорев А.И. Комплексно-легированный титановый сплав ВТ23 универсального применения // Технология машиностроения. 2007. № 7. С. 23–40.
6. 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.
7. Авиационные материалы: справочник в 13 т. М.: ВИАМ, 2010. Т. 6: Титановые сплавы. 95 с.
8. Брун М.Я., Белов С.П., Глазунов С.Г. и др. Металловедение титановых сплавов. М.: Металлургия, 1994. 351 с.
9. 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: 17.09.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-36-44.
10. 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. 3 (72). С. 34–40.
11. Швецов О.В., Кондратьев С.Ю. Влияние режимов закалки и старения на эксплуатационные свойства сплава ВТ23 // Научно-технические ведомости СПбГУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24. № 2. С. 119–133.
12. 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: 25.09.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-2-3-3.
13. 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: 17.09.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-30-40.
14. Цепин М.А., Бегнарский В.В., Лисунец Н.Л., Сеницын М.В., Ерохов М.А. Использование специализированных программ при разработке технологических процессов обработки металлов давлением // Цветные металлы. 2007. № 5. С. 98–101.
15. Стебунов С.А., Биба Н.В. Qform – программа, созданная для технологов // Кузнечно-штамповое производство. Обработка металлов давлением. 2004. № 9. С. 38–43.

References

1. Moiseev V.N. Beta-titanium alloys and prospects for their development. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 1998, no. 12, pp. 11–14.
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. 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: September 17, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-50-59.
4. 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: 10.18577/2071-91.
5. Khorev A.I. Complex-alloyed titanium alloy VT23 for universal use. *Tekhnologiya mashinostroyeniya*, 2007, no. 7, pp. 23–40.
6. Kablov E.N., Putyrskiy S.V., Yakovlev A.L., Krokhina V.A., Naprienko S.A. Study of fatigue fracture resistance of stampings 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.
7. *Aviation materials: handbook in 13 vols.* Moscow: VIAM, 2010, vol. 6: Titanium alloys, 95 p.
8. Brun M.Ya., Belov S.P., Glazunov S.G. et al. *Metallurgy of titanium alloys*. Moscow: Metallurgiya, 1994, 351 p.
9. Krokhina 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: September 17, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-36-44.
10. 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. 3 (72), pp. 34–40.
11. Shvetsov O.V., Kondratiev S.Yu. Influence of hardening and aging modes on the operational properties of VT23 alloy. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGU. Estestvennye i inzhenernye nauki*, 2018, vol. 24, no. 2, pp. 119–133.
12. Razuvaev 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: September 25, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-2-3-3.
13. Duyunova V.A., Oglovkov 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: September 17, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-30-40.
14. Tsepin M.A., Begnarsky V.V., Lisunets N.L., Sinitsyn M.V., Erokhov M.A. Using specialized programs in developing technological processes for metal forming. *Tsvetnye metally*, 2007, no. 5, pp. 98–101.
15. Stebunov S.A., Biba N.V. Qform – a program created for technologists. *Kuznechno-shtampovoe proizvodstvo. Obrabotka metallov davleniem*, 2004, no. 9, pp. 38–43.

Информация об авторах

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

Капитаненко Денис Владимирович, начальник лаборатории, 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

Denis V. Kapitanenko, Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 14.10.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 02.12.2024.
The article was submitted 14.10.2024; approved and accepted for publication after reviewing 02.12.2024.