



УДК 621.74
DOI: 10.21122/1683-6065-2018-92-3-141-147

Поступила 15.04.2018
Received 15.04.2018

РЕЖИМЫ УПРОЧНЕНИЯ ВЫСОКОПРОЧНОГО ($\alpha+\beta$)-ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT23 ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКЕ

В. Н. ФЕДУЛОВ, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. Тел. +375 29 631 09 85

Рекомендованы новые режимы термического упрочнения различных полуфабрикатов из высокопрочного титанового сплава VT23 и приведены их механические и специальные свойства, полученные в результате проведения исследований.

Ключевые слова. Термическая обработка, титановый сплав VT23, полуфабрикаты, упрочнение, закалка на воздухе, старение, технологические факторы, свойства.

Для цитирования. Федулов, В. Н. Режимы упрочнения высокопрочного ($\alpha+\beta$)-титанового сплава VT23 для применения в авиационной технике / В. Н. Федулов // Литье и металлургия. 2018. Т. 92. № 3. С. 141–147. DOI: 10.21122/1683-6065-2018-92-3-141-147.

MODES OF HARDENING OF A HIGH-STRENGTH ($\alpha+\beta$)-TITANIUM ALLOY VT23 FOR USE IN AERONAUTICAL ENGINEERING

V. N. FEDULOV, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. Tel. +375 29 631 09 85

New modes of thermal hardening of various semi-finished products made from high-strength titanium alloy VT23 are recommended, and the mechanical and special properties obtained as a result of their research are given.

Keywords. Heat treatment, titanium alloy VT23, semi-finished products, hardening, air quenching, aging, technological factors, properties.

For citation. Fedulov V. N. Modes of hardening of a high-strength ($\alpha+\beta$)-titanium alloy VT23 for use in aeronautical engineering. Foundry production and metallurgy, 2018, vol. 92, no. 3, pp. 141–147. DOI: 10.21122/1683-6065-2018-92-3-141-147.

Для успешной конкуренции титановых сплавов в авиации с высокопрочными сталями необходимо повысить гарантированную прочность в деталях из них до $\sigma_B = 1080\text{--}1180$ МПа ($110\text{--}120$ кгс/мм²) при удовлетворительных характеристиках пластичности, вязкости разрушения и малоциклового усталости. Проведенные ранее комплексные исследования по термической обработке различных полуфабрикатов и готовых деталей из сплава VT23 позволили показать научные достижения и возможные варианты прогресса в разработке новых и оптимизации известных технологических схем проведения мероприятий для повышения уровня свойств [1–21]. Однако результаты исследований в части их возможного использования сейчас в реальной практике не определены.

Задачей настоящей работы является систематизация полученных ранее автором данных по режимам термической обработки целого ряда полуфабрикатов из сплава VT23 с целью выявления возможности использования их непосредственно на предприятиях авиастроения и для нужд космоса.

Методически это сделано в виде таблицы, суммирующей режимы технологий упрочнения с приведением данных по механическим и специальным свойствам для рекомендованных случаев их применения в реальной практике авиастроения. При рассмотрении рекомендованных режимов дано более подробное толкование результатов проведенных исследований. Механические свойства (σ_B , δ , ψ , КСЧ и КСТ) в данном случае определяли по стандартным методикам (КСТ – на образце типа 19), малоцикловую усталость – на машине EUS-100 на гладких образцах диаметром 10 мм ($\sigma_{\max} = 75$ кгс/мм², $\nu = 3$ Гц) и с кольцевым надрезом ($r = 0,1$ мм; $k_t = 4,0$; $\sigma_{\max} = 40$ кгс/мм²; $\nu = 3$ Гц).

Одна из отличительных особенностей сплава VT23 – образование значительного количества метастабильной β_M -фазы в структуре при охлаждении полуфабрикатов на воздухе после проведения горячей

деформации или дополнительного нагрева при температурах верхней части ($\alpha+\beta$)-области и охлаждения на воздухе («мягкая» закалка). Этот факт послужил основой для совершенствования технологий термической обработки в настоящей работе. Например, прочность сплава ВТ23 $\sigma_B = 1150$ МПа достигается уже после высокотемпературного нагрева заготовок при 850 °С в течение 1 ч и охлаждении со скоростью не менее 0,22 °С/с и последующего старения при температуре 450 °С в течение 8 ч [22].

Сначала возник вопрос по разработке режима нагрева взамен отжига для горячедеформированных полуфабрикатов из сплава ВТ23, так как предложенный ранее нагрев при 700–750 °С обеспечивал гарантированный уровень прочности только в пределах $\sigma_B \geq 1030$ МПа. Одновременно из условий конкуренции с полуфабрикатами других ($\alpha+\beta$)-титановых сплавов необходимо было решать вопрос разработки режима, способного повысить гарантированный уровень прочности сплава ВТ23 для всех видов полуфабрикатов до $\sigma_B \geq 1080$ МПа (110 кгс/мм²) при высоких характеристиках пластичности, ударной вязкости и трещиностойкости (табл. 1).

Таблица 1. Механические свойства горячедеформированных полуфабрикатов из сплава ВТ23 после нагрева при температуре 600–620 °С в течение до 1 ч

Вид полуфабриката	Номер плавки	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %	КСУ, МДж/м ² (не менее)
Плита толщиной 100 мм	8-46-466-2	1080–1100	12–14	32–38	0,4–0,45
Плита толщиной 60 мм	8-42-177-1	1100–1120	9–11	32–36	0,4–0,45
Плита толщиной 45 мм	8-46-158-2	1110–1120	9–10	35–37	0,4–0,45
Пруток диаметром 100 мм	18-639	1090–1110	10–11	35–38	0,4–0,45
Пруток диаметром 60 мм	8-941	1120–1150	10–13	39–43	0,4–0,5
Пруток диаметром 40 мм	18-888	1150–1180	12–16	40–45	0,4–0,5

После нагрева образцов кованокатаной плиты толщиной 100 мм при температуре 600–620 °С, выдержке в течение 0,5–1 ч и охлаждении на воздухе прочность сплава ВТ23 составила $\sigma_B = 1080–1100$ МПа при одновременном высоком уровне пластичности. Это связано с тем, что при медленном и равномерном нагреве заготовок плиты до температуры 600–620 °С и выдержке в течение 0,5–1 ч происходит выравнивание тонкой структуры и фазового состава сплава ВТ23 за счет распада твердого раствора в местах наличия не превращенной метастабильной β_M -фазы с выделением гетерофазных продуктов, а коагуляции мелких частиц, образовавшихся ранее в процессе охлаждения плиты на воздухе после прокатки, не происходит. Коагуляция частиц вторичной α -фазы становится реально действующим фактором при увеличении времени выдержки более 2 ч, когда начинает заметно падать прочность. Можно также предположить протекание других, связанных с горячей ковкой или прокаткой процессов при нагреве до 600–620 °С и выдержке в течение до 1 ч в структуре горячедеформированного сплава ВТ23. Равномерное охлаждение с температуры 600–620 °С на воздухе: скорость охлаждения в начале составляет 0,15–0,2 °С/с, а затем снижается до 0,05 °С/с, способствует стабилизации структуры и фазового состава горячедеформированного сплава ВТ23 (около 30% β -фазы, $a_\beta = 0,3210$ нм). О высокой стабильности β -фазы в сплаве ВТ23 после нагрева заготовок при температуре 600–620 °С и охлаждении на воздухе говорит тот факт, что ее заметный распад в структуре при последующем нагреве начинается только при температуре выше 525 °С в течение 10 ч, а эксплуатация деталей производится при температуре до 400 °С. При таком режиме термической обработки не происходит огрубления структуры и поэтому обеспечивается высокая пластичность сплава ВТ23: $\delta = 11–13\%$, $\psi = 30–38\%$ и $\delta = 12–14\%$, $\psi = 35–41\%$ соответственно для температур 600 и 620 °С. К тому же этот режим является весьма простым и экономичным способом проведения термической обработки.

Образцы, вырезанные из прутков толщиной 40 мм после нагрева при 600–620 °С, подвергали также испытаниям на малоцикловую усталость (МЦУ): образцы диаметром 10 мм с кольцевым острым концентратором, и определяли удельную работу вязкости разрушения образцов с трещиной (КСТ). Испытания показали, что количество циклов до разрушения составило $N = 16\ 000–25\ 000$ ($N_{ср.} = 18\ 500$ циклов), а значение КСТ было в пределах (не менее) 0,3–0,35 МДж/м² (табл. 2, п. 1). Таким образом, режим нагрева может быть рекомендован для проведения термического упрочнения заготовок толщиной до 100 мм и изготовления из них впоследствии различных деталей.

Результаты термического упрочнения с использованием заготовок переменного сечения размерами 20–160×350×400 мм показали, что при температуре нагрева 850 °С в течение 2 ч, охлаждения на воздухе и последующего старения при температуре 450 °С в течение 10 ч при толщине 100–160 мм их можно упрочнять на гарантированный уровень $\sigma_B = 1130$ МПа (115 кгс/мм²), 30–80 мм – на гарантированный

уровень $\sigma_B = 1180$ МПа (120 кгс/мм²), а менее 25 мм – на уровень $\sigma_B = 1225$ МПа (125 кгс/мм²) при значениях $\delta \geq 5\%$, $\psi \geq 13\%$, $KCU \geq 0,35$ МДж/м². Ранее было показано [22], что длительный (в течение 2–3 ч) нагрев при 850 °С, несмотря на выравнивание структуры по сечению, для заготовок плиты из сплава ВТ23 не желателен, так как вызывает значительное изменение исходной структуры: мелкие частицы и пластины α -фазы полностью растворяются, а более крупные за счет частичного растворения приобретают форму линз, что в общем случае термического упрочнения вызывает снижение пластичности и ударной вязкости (микроструктура приведена в работе [22]).

Достичь значительного эффекта позволило внедрение разработанного режима термического упрочнения подобных фасонных заготовок из сплава ВТ23, имевших переменное сечение от 20 до 160 мм и изготовленных из плиты толщиной 160 мм, массой около 30 кг, при температуре закалки около 880 °С и охлаждении на воздухе. При этом сократили длительность выдержки при температуре «мягкой» закалки до $0,5$ ч. Последующее охлаждение на воздухе было достаточным для фиксирования β_M -фазы по всему сечению, а старение уже при 520 °С в течение 8 ч обеспечило получение механических свойств сплава ВТ23 в пределах: $\sigma_B = 1190$ – 1225 МПа, $\delta \geq 6\%$, $\psi \geq 15\%$, $KCU = 0,35$ – $0,4$ МДж/м² для толщины заготовки до 60 мм и $\sigma_B = 1150$ – 1180 МПа при толщине заготовки свыше 80 мм при тех же значениях остальных характеристик (табл. 2, п. 2).

Таблица 2. Рекомендуемые режимы термического упрочнения для различного вида горячедеформированных полуфабрикатов из сплава ВТ23 для использования в практике авиастроения при изготовлении деталей различного назначения

№ п. п.	Режим термической обработки	Механические свойства (не менее)				Малоцикловая усталость, количество циклов до разрушения ($N_{ср}$) при $r = 0,1$ мм; $k_t = 4,0$; $\sigma_{max} = 40$ кгс/мм ² ; $v = 3$ Гц
		σ_B , МПа	δ , %	ψ , %	KCU (KCT), МДж/м ²	
1	Нагрев при температуре 600 – 620 °С, 1 – 2 ч для горячедеформированных полуфабрикатов	1080	10	30	0,5 (0,3)	18500
2	Нагрев при температуре 880 – 900 °С в течение $0,5$ – 1 ч, охлаждение на воздухе + старение: 525 °С, 6 – 8 ч	1125	6	15	0,35 (0,15)	16500
3	Для горячекатаных и кованных полуфабрикатов выполняется только старение при температуре 430 °С, 8 – 10 ч (ВТМО-2) с обеспечением свойств для плит толщиной:		6	15	0,4 (0,15)	18000–19000
	до 30 мм	1180				
	40 – 50 мм	1120				
	от 60 до 100 мм	1080				
	160 мм	1040				
	для прутков диаметром 25 – 60 мм	1180				
	100 мм	1080				

Таблица 3. Влияние технологических параметров при старении на механические свойства плиты толщиной 100 мм из сплава ВТ23

Вид материала и режим термической обработки	Вид образцов при проведении старения	Среда и скорость охлаждения после старения	Режим кратковременного нагрева заготовок после старения	Значения механических свойств (не менее)				
				σ_B , МПа	δ , %	ψ , %	KCU, МДж/м ²	KCT, МДж/м ²
Плита толщиной 100 мм из сплава ВТ23, исходное состояние	–	–	–	1060	12	35	0,60	0,35
ВТМО + старение 430 °С, 8 ч в атмосфере воздушной печи	Заготовки $10 \times 10 \times 55$ мм	С печью $2,5$ °С/мин	Нет	1120	9	25	0,45	0,25
	Готовые образцы*	На воздухе 2 – 4 °С/с	Нет	1110	8	30	0,45	0,30
	Заготовки $10 \times 10 \times 55$ мм	На воздухе 2 – 4 °С/с	Нет	1110	9	30	0,45	0,30
	Заготовки $10 \times 10 \times 55$ мм	На воздухе 2 – 4 °С/с	550 °С, 20 мин, охл. вода	1090	8	25	0,55	0,35
	То же	В воде 40 – 50 °С/с	Нет	1120	8	20	0,50	0,30
	То же	То же	550 °С, 20 мин, охл. вода	1080	8	30	0,60	0,40

* Изготовление образцов для испытания на разрыв до проведения всех режимов термической обработки; в остальных случаях – образцы на разрыв испытывали после проведения механической обработки упрочненных заготовок; для образцов на испытание ударной вязкости и трещиностойкости после термической обработки – только прорезка специальной канавки.

Таблица 4. Влияние технологических параметров старения на малоцикловую усталость образцов плиты толщиной 100 мм из сплава ВТ 23

Режим и условия термической обработки	Вид образца при старении	Условия охлаждения после старения	Режим кратковременного нагрева образцов после старения	Количество циклов до разрушения (N) при частоте $\nu = 5$ Гц	
				гладкие образцы диаметром 10 мм ($\sigma_{\max} = 75$ кгс/мм ²)	образцы диаметром 10 мм с острым надрезом ($K_t = 4,0, \sigma_{\max} = 40$ кгс/мм ²)
430 °С, 8 ч в вакуумной электропечи	Окончательно-обработанные образцы	С печью со скоростью 0,2 °С/мин	Нет	29000–47500 ср. 37500	–
430 °С, 8 ч в воздушной электропечи	То же	На воздухе 2 °С/с	Нет	35000–57000 ср. 47000	–
	Заготовки 15×15×100 мм	На воздухе 2 °С/с	Нет Выполнено точение образцов из заготовки	114500–293000 ср. 200000 (наклеп от проведения точения)	13500–15000 ср. 14000
	Окончательно-обработанные образцы	На воздухе 2 °С/с	Готовые образцы, 550 °С, 20 мин, охл. в воде	23000–40500 ср. 30000	17000–22500 ср. 20000
	Окончательно-обработанные образцы	На воздухе 2 °С/с	Готовые образцы, 550 °С, 20 мин, охл. в воде + пескообдувка	220000–400000 ср. 320000 (наклеп от опескоструивания кварцевым песком)	–
	Заготовки 15×15×100 мм	На воздухе 2 °С/с	Заготовки, 550 °С, 20 мин, охл. в воде и точение образцов из заготовок	216000–353000 ср. 300000 (наклеп от механической обработки: точение)	16700–22500 ср. 19000

Для деталей, изготовленных из горячедеформированных заготовок сплава ВТ23, нашло широкое применение термическое упрочнение в виде только операции старения (ВТМО-2) [20, 23]. Проведение исследований показало, что наиболее хорошие результаты обеспечивает режим старения при температуре 430 °С в течение до 10 ч (табл. 2, п. 3). Для такого случая термического упрочнения характерно влияние технологических параметров, таких, как среда нагрева и вид изделия (заготовка или окончательно механически обработанное состояние), условия охлаждения изделий после выдержки при температуре старения, проведение кратковременного нагрева после старения до более высокого значения температуры по сравнению с температурой старения на свойства упрочняемого сплава и очередности проведения операции изготовления образцов (табл. 3 и 4).

Указанный процесс был освоен для производства деталей из кованокатаных плит сплава ВТ23 в качестве упрочняющей термической обработки. Процесс этот для окончательно механически обработанных деталей ранее проводили в вакуумных электропечах типа УВН-1500, что требует значительной энергоёмкости и длительности. В принципе такую термическую обработку рекомендовалось осуществлять и в воздушных электропечах в заготовках с последующей механической обработкой. Результаты исследований влияния технологических параметров процесса показали, что значения σ_v мало зависят от состояния поверхности образцов и скорости охлаждения с температуры старения (табл. 3). Для характеристик пластичности (δ, ψ) влияние состояния поверхности образцов также незначительно, а вот скорость охлаждения с температуры старения наиболее благоприятна в интервале около 1–4 °С/с (в данном случае охлаждение на воздухе). Видимо такая (или близкая к этой) скорость охлаждения уменьшает образование в процессе охлаждения с 430 °С хрупких выделений (образований) по границам раздела α/β -фаз (не происходит охрупчивания межфазных границ), снижающих пластичность сплава, но в то же время способствует возникновению незначительных сжимающих термических напряжений в объеме образца в результате охлаждения. Увеличение $\nu_{\text{охл.}}$ до 20–50 °С/с (охлаждение в воде) приводит к снижению значений ψ по сравнению с охлаждением на воздухе из-за возникновения высокого уровня сжимающих термических напряжений: межфазных (II рода) в структуре и I рода в металле заготовки в результате менее интенсивного охлаждения ее середины по сравнению с наружными слоями, что характерно для титана и его сплавов из-за низкой теплопроводности. Уменьшение же скорости охлаждения до 2,5 °С/мин (в данном случае охлаждение с печью) по сравнению с охлаждением на воздухе незначительно снижает нижний уровень и чуть увеличивает разброс значений ψ , что вызвано, вероятно, образованием по межфазным границам при более медленном охлаждении некогерентных хрупких образований со сложным

строением. И, наоборот, повышение $v_{\text{охл.}}$ (от охлаждения с печью до охлаждения образцов в воде) с температуры старения повышает значения ударной вязкости (КСУ и КСТ) сплава: при охлаждении с печью КСУ = 0,45 МДж/м², КСТ = 0,25 МДж/м²; при охлаждении на воздухе КСУ = 0,45 МДж/м², КСТ = 0,3 МДж/м²; при охлаждении в воде КСУ = 0,5 МДж/м², КСТ = 0,3 МДж/м². Это также вызвано возрастанием уровня остаточных сжимающих напряжений I и II рода в металле при увеличении интенсивности охлаждения с температуры 430 °С, препятствующих разрушению при ударных нагрузках и одновременно снижающих по сравнению с более медленным охлаждением количество выделившихся охрупчивающих элементов на границах раздела α/β -фаз. Еще более значительному повышению значений КСУ и КСТ по сравнению с охлаждением образцов с температуры старения на воздухе способствует проведение после старения дополнительного кратковременного нагрева заготовок в печи при температуре 550 °С в течение 20 мин с последующим охлаждением в воде: при охлаждении с температуры старения на воздухе до значений КСУ = 0,55 МДж/м² и КСТ \geq 0,35 МДж/м²; при охлаждении с температуры старения в воде КСУ = 0,60 МДж/м² и КСТ \geq 0,40 МДж/м². При этом остальные механические свойства (σ_b , δ , ψ) изменяются менее значительно. Проведение кратковременного нагрева заготовок до 550 °С с последующим охлаждением в воде, по всей видимости, способствует растворению наиболее мелких охрупчивающих сплав частиц (некогерентных выделений) или прослоек α -фазы, образовавшихся во время выдержки при температуре старения 430 °С, т. е. повышению когерентности границ раздела α -фазы и β -матрицы [23].

Для малоциклового усталости (табл. 4) гладких образцов из плиты сплава ВТ23, когда их старение проводили после окончательной механической обработки [22] в вакууме или в воздушной среде, была получена разница в результатах: соответственно $N_{\text{ср.}} = 37\,500$ циклов и $N_{\text{ср.}} = 47\,000$ циклов. Здесь предпочтительнее следует отдать проведению старения в воздушной электропечи. В данном случае на поверхности образцов образуется тончайшая (серовато-фиолетового цвета) оксидная пленка, которая менее склонна к зарождению трещин по сравнению с поверхностью, полученной после нагрева в вакууме [23]. При проведении старения в заготовках и последующем изготовлении образцов точением лучшие результаты при испытании малоциклового усталости как гладких образцов, так и образцов с надрезом были получены для случая охлаждения заготовок с температуры старения в воде ($v_{\text{охл.}} = 15\text{--}20$ °С/с): $N_{\text{ср.}} = 300\,000$ циклов (гладкие образцы) и $N_{\text{ср.}} = 19\,000$ циклов (образцы с острым надрезом). В случае охлаждения заготовок на воздухе получили соответственно $N_{\text{ср.}} = 200\,000$ циклов и $N_{\text{ср.}} = 18\,000$ циклов. Здесь свою положительную роль опять же играют сжимающие термические напряжения, имеющие более высокий уровень после охлаждения в воде и препятствующие как образованию трещин, так и их дальнейшему продвижению в сплаве. Изготовление образцов из заготовок точением после проведения старения по сравнению со старением образцов в окончательно механически обработанном виде при испытаниях малоциклового усталости гладких образцов также за счет наличия сжимающих напряжений от точения обеспечивает повышение значений $N_{\text{ср.}}$ практически на порядок: для случаев охлаждения при старении на воздухе $N_{\text{ср.}} = 200\,000$ циклов и $N_{\text{ср.}} = 47\,000$ циклов соответственно. Проведение после старения дополнительного кратковременного нагрева готовых образцов в печи при температуре 550 °С в течение 20 мин и охлаждение в воде благоприятствует повышению при испытаниях на малоцикловую усталость количества циклов до разрушения образцов с надрезом: $N_{\text{ср.}} = 20\,000$ циклов (сразу после старения $N_{\text{ср.}} = 19\,000$ циклов). Что касается в данном случае малоциклового усталости гладких образцов после старения в воздушной электропечи ($N_{\text{ср.}} = 47\,000$ циклов), то ее можно повысить проведением пескоструйной обработки поверхности корундовым песком по известной технологии ($N_{\text{ср.}}$ до 300 000 циклов).

Таким образом, могут быть рекомендованы новые режимы термического упрочнения различных горячедеформированных полуфабрикатов из высокопрочного титанового сплава ВТ23 (см. табл. 2). Можно применять и другие варианты термического упрочнения с использованием режимов, приведенных в работах [2–17].

ЛИТЕРАТУРА

1. Федулов В. Н. Обсуждение состояния и перспектив развития термической обработки ($\alpha+\beta$)-титановых сплавов // Литье и металлургия. 2011. № 3. С. 152–158.
2. А. с. № 1129958 СССР, МКИ: С 22F1/18. Способ термической обработки сварных конструкций из ($\alpha+\beta$)-титановых сплавов / М. А. Хорев, В. Н. Федулов, Ю. М. Должанский (СССР); заявка № 3649359/22-02 от 30.09.83. Оpubл. 22.10.84.
3. А. с. № 1362065 СССР, М. К. И.: С 22F1/18. Способ обработки полуфабрикатов из двухфазных титановых сплавов / В. Н. Федулов, А. И. Хорев (СССР); заявка № 3994518/22-02 от 20.12.85. Оpubл. 22.09.87.

4. А. с. № 1144408 СССР, МКИ: С 22F1/18. Способ термической обработки деталей из $(\alpha+\beta)$ -титановых сплавов / В. Н. Федулов, А. И. Хорев (СССР); заявка № 3675079/22-02 от 15.12.83. Оpubл. 10.01.85.
5. А. с. № 1492756 СССР, МКИ: С 22F1/18. Способ термической обработки крупногабаритных полуфабрикатов из двухфазных титановых сплавов / В. Н. Федулов, А. И. Хорев (СССР); заявка № 4318529/23-02 от 20.10.87. Оpubл. 10.11.89.
6. А. с. № 1153573 СССР, МКИ: С 22F1/18. Способ термической обработки полуфабрикатов и деталей из двухфазных титановых сплавов / В. Н. Федулов, А. И. Хорев (СССР); заявка № 3698788/22-02 от 30.01.84. Оpubл. 28.02.85.
7. А. с. № 1584425 СССР, МКИ: С 22F1/18. Способ термической обработки деталей из двухфазных титановых сплавов / В. Н. Федулов, А. И. Хорев, М. М. Мартынова, С. Л. Демаков (СССР); заявка № 4650956/27-02 от 03.11.88. Оpubл. 08.04.90.
8. А. с. № 1593276 СССР, МКИ: С 22F1/18. Способ термической обработки полуфабрикатов переменного сечения / В. Н. Федулов, А. И. Хорев, С. Л. Демаков, А. А. Попов (СССР); заявка № 4656201/27-02 от 28.02.89. Оpubл. 15.05.90.
9. А. с. № 1238413 СССР, МКИ: С 22F1/18. Способ термической обработки $(\alpha+\beta)$ -титановых сплавов / В. Н. Федулов, М. М. Мартынова, А. И. Хорев, В. В. Стычинский (СССР); заявка № 3789715/22-02 от 15.09.84. Оpubл. 15.02.86.
10. А. с. № 1427864 СССР, МКИ: С 22F1/18. Способ обработки полуфабрикатов из двухфазных титановых сплавов / В. Н. Федулов, А. И. Хорев, А. А. Попов и др. (СССР); заявка № 4177264/23-02 от 07.01.87. Оpubл. 01.06.88.
11. А. с. № 1561538 СССР, МКИ: С 22F1/18. Способ термической обработки титановых сплавов / В. Н. Федулов, А. И. Хорев, М. М. Мартынова (СССР); заявка № 4430881/23-02 от 26.05.88. Оpubл. 03.01.90.
12. А. с. № 1593273 СССР, МКИ: С 22F1/18. Способ термической обработки деталей из двухфазных титановых сплавов / В. Н. Федулов, А. И. Хорев, С. Л. Демаков, А. А. Попов (СССР); заявка № 4646761/27-02 от 06.02.89. Оpubл. 15.05.90.
13. А. с. № 1376598 СССР, МКИ: С 22F1/18. Способ термической обработки полуфабрикатов и деталей из двухфазных титановых сплавов / В. Н. Федулов, А. И. Хорев, А. А. Попов, М. М. Мартынова (СССР); заявка № 4099382/22-02 от 12.05.86. Оpubл. 22.10.87.
14. А. с. № 1459273 СССР, МКИ: С 22F1/18. Способ термической обработки заготовок из двухфазных титановых сплавов / В. Н. Федулов, А. И. Хорев (СССР); заявка № 4242758/23-02 от 12.05.87. Оpubл. 10.01.89.
15. А. с. № 1427863 СССР, МКИ: С 22F1/18. Способ обработки длинномерных полуфабрикатов из двухфазных титановых сплавов / В. Н. Федулов, А. И. Хорев, М. М. Мартынова, А. А. Попов (СССР); заявка № 4176852/23-02 от 07.01.87. Оpubл. 01.06.88.
16. А. с. № 1579077 СССР, МКИ: С 22F1/18. Способ термической обработки сварных изделий из двухфазных титановых сплавов / В. Н. Федулов, А. И. Хорев, М. М. Мартынова (СССР); заявка № 4601214/27-02 от 03.11.88. Оpubл. 15.03.90.
17. Федулов В. Н. Способ термической обработки изделий из $(\alpha+\beta)$ – титановых сплавов / Пат. Респ. Беларусь, № 9345 от 08.07.2004 г.
18. Федулов В. Н. Определение допустимого верхнего предела упрочнения сплава ВТ23 в процессе термической обработки изделий из заготовок плиты // *Литье и металлургия*. 2007. № 4 (44). С. 92–95.
19. Федулов В. Н. Режимы термического упрочнения и свойства сплава ВТ23 при повышенных температурах // *Литье и металлургия*. 2008. № 1 (46). С. 155–157.
20. Федулов В. Н. Перспективные технологии термического упрочнения крупногабаритных изделий из двухфазных титановых сплавов // *Литье и металлургия*. 2005. № 2 (34). С. 171–173.
21. Федулов В. Н. Об оценке термического упрочнения заготовок титановых сплавов в зависимости от условий и схемы ихковки // *Литье и металлургия*. 2005. № 3 (35). С. 122–123.
22. Федулов В. Н., Хорев А. И., Попов А. А. Влияние интенсивности охлаждения с температуры 850°C на выбор режимов последующего старения изделий из сплава ВТ23 // *Технология: Оборудование, материалы, процессы*. 1988. № 4. С. 21–25.
23. Федулов В. Н. О влиянии некоторых технологических параметров старения на свойства деталей из горячедеформированных $(\alpha+\beta)$ -титановых сплавов // *Авиационная промышленность*. 1990. № 9. С. 69–71.

REFERENCES

1. Fedulov V. N. Obsuzhdenie sostoyaniya i perspektiv razvitiya termicheskoy obrabotki $(\alpha + \beta)$ -titanovykh spлавov [Discussion of the state and prospects for the development of thermal treatment of $(\alpha + \beta)$ -titanium alloys]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2011, no. 3, pp. 152–158.
2. Chorev M. A., Fedulov V. N., Dolzhansky Yu. M. *Sposob termicheskoy obrabotki svarnykh konstruktsiy iz $(\alpha+\beta)$ -titanovykh spлавov* [Method for the thermal treatment of welded structures from $(\alpha+\beta)$ -titanium alloys]. A. s. no. 1129958 USSR, MКИ: С 22F1/18. Opubl. 22.10.84.
3. Fedulov V. N., Chorev A. I. *Sposob obrabotki polufabrikatov iz dvuchfaznykh titanovykh spлавov* [Method of processing semifinished products from two-phase titanium alloys]. A. s. no. 1362065 USSR, MКИ: С 22F1/18. Opubl. 22.09.87.
4. Fedulov V. N., Chorev A. I. *Sposob termicheskoy obrabotki detaley iz $(\alpha+\beta)$ -titanovykh spлавov* [Method of heat treatment of details from $(\alpha+\beta)$ -titanium alloys]. A. s. no. 1144408 USSR, MКИ: С 22F1/18. Opubl. 10.01.85.
5. Fedulov V. N., Chorev A. I. *Sposob termicheskoy obrabotki krupnogabaritnykh polufabrikatov iz dvuchfaznykh titanovykh spлавov* [Method of heat treatment of large-sized semi-finished products from biphasе titanium alloys]. A. s. no. 1492756 USSR, MКИ: С 22F1/18. Opubl. 10.11.89.
6. Fedulov V. N., Chorev A. I. *Sposob termicheskoy obrabotki polufabrikatov i detaley iz dvuchfaznykh titanovykh spлавov* [Method of heat treatment of semifinished products and details of two-phase titanium alloys]. A. s. no. 1153573 USSR, MКИ: С 22F1/18. Opubl. 28.02.85.
7. Fedulov V. N., Chorev A. I., Martynova M. M., Demakov S. L. *Sposob termicheskoy obrabotki detaley iz dvuchfaznykh titanovykh spлавov* [Method of heat treatment of details from two-phase titanium alloys]. A. s. no. 1584425 USSR, MКИ: С 22F1/1. Opubl. 08.04.90.
8. Fedulov V. N., Chorev A. I., Demakov S. L., Popov A. A. *Sposob termicheskoy obrabotki polufabrikatov peremennogo secheniya* [Method of heat treatment of semi-finished products of variable cross-section]. A. s. no. 1593276 USSR, MКИ: С 22F1/18. Opubl. 15.05.90.
9. Fedulov V. N., Martynova M. M., Chorev A. I., Stychinsky V. V. *Sposob termicheskoy obrabotki $(\alpha+\beta)$ -titanovykh spлавov* [Method of thermal treatment of $(\alpha+\beta)$ -titanium alloys]. A. s. no. 1238413 USSR, MКИ: С 22F1/18. Opubl. 15.02.86.

10. **Fedulov V. N., Chorev A. I., Popov A. A.** i drugie. *Sposob obrabotki polufabrikatov iz dvuchfaznykh titanovykh splavov* [Method of processing semifinished products from biphas titanium alloys]. A. s. no. 1427864 USSR, MKI: C 22F1/18. Opubl. 01.06.88.
11. **Fedulov V. N., Chorev A. I., Martynova M. M.** *Sposob termicheskoy obrabotki titanovykh splavov* [Method of thermal treatment of titanium alloys]. A. s. no. 1561538 USSR, MKI: C 22F1/18. Opubl. 03.01.90.
12. **Fedulov V. N., Chorev A. I., Demakov S. L., Popov A. A.** *Sposob termicheskoy obrabotki detaley iz dvuchfaznykh titanovykh splavov* [Method of heat treatment of parts from two-phase titanium alloys]. A. s. no. 1593273 USSR, MKI: C 22F1/18. Opubl. 15.05.90.
13. **Fedulov V. N., Chorev A. I., Popov A. A., Martynova M. M.** *Sposob termicheskoy obrabotki polufabrikatov i detaley iz dvuchfaznykh titanovykh splavov* [Method of heat treatment of semifinished products and details of two-phase titanium alloys]. A. s. № 1376598 USSR, MKI: C 22F1/18. Opubl. 22.10.87.
14. **Fedulov V. N., Chorev A. I.** *Sposob termicheskoy obrabotki zagotovok iz dvuchfaznykh titanovykh splavov* [Method of heat treatment of billets from biphas titanium alloys]. A. s. no. 1459273 USSR, MKI: C 22F1/18. Opubl. 10.01.89.
15. **Fedulov V. N., Chorev A. I., Martynova M. M., Popov A. A.** *Sposob obrabotki dlinnomernykh polufabrikatov iz dvuchfaznykh titanovykh splavov* [Method for processing long-length semi-finished products from biphas titanium alloys]. A. s. no. 1427863 USSR, MKI: C 22F1/18. Opubl. 01.06.88.
16. **Fedulov V. N., Chorev A. I., Martynova M. M.** *Sposob termicheskoy obrabotki svarnykh izdeliy iz dvuchfaznykh titanovykh splavov* [Method of heat treatment of welded products from two-phase titanium alloys]. A. s. no. 1579077 USSR, MKI: C 22F1/18. Opubl. 15.03.90.
17. **Fedulov V. N.** *Sposob termicheskoy obrabotki izdeliy iz dvuchfaznykh titanovykh splavov* [Method of thermal treatment of products from ($\alpha + \beta$)-titanium alloys]. Patent of the Republic Belarus, no. 9345. Opub. 08.07. 2004.
18. **Fedulov V. N.** *Opreделение dopustimogo verhnego predela uprochneniya splava VT23 v processe termicheskoy obrabotki izdeliy iz zagotovok plit* [Determination of the allowable upper limit of hardening of the VT23 alloy in the course of heat treatment of products from plate blanks]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and Metallurgy*, 2007, no. 4 (44), pp. 92–95.
19. **Fedulov V. N.** *Rezhimy termicheskogo uprochneniya i svoystva splava VT23 pri povyshennykh temperaturakh* [Modes of thermal hardening and properties of VT23 alloy at elevated temperatures]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2008, no. 1 (46), pp. 155–157.
20. **Fedulov V. N.** *Perspektivnye tehnologii termicheskogo uprochneniya krupnogabaritnykh izdeliy iz dvuchfaznykh titanovykh splavov* [Perspective technologies of thermal hardening of large-sized products from two-phase titanium alloys]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2005, no. 2 (34), pp. 171–173.
21. **Fedulov V. N.** *Ob ocnke termicheskogo uprochneniya zagotovok titanovykh splavov v zavisimosti ot usloviy i shemy ich kovki* [On the evaluation of the thermal hardening of blanks of titanium alloys depending on the conditions and the scheme for forging them]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2005, no. 3 (35), pp. 122–123.
22. **Fedulov V. N., Chorev A. I., Popov A. A.** *Vliyanie intensivnosti ochlazhdeniya s temperatury 850 °C na vybor rezhimov posleduyushhego stareniya izdeliy iz splava VT23* [Influence of the cooling intensity from the temperature of 850 °C on the choice of the regimes of the subsequent aging of products made of the VT23 alloy]. *Technologiya: Oborudovanie, materialy, processy = Technology: Equipment, materials, processes*, 1988, no. 4, pp. 21–25.
23. **Fedulov V. N.** *O vliyanii nekotorykh tehnologicheskikh parametrov stareniya na svoystva detaley iz goryachedeformirovannykh ($\alpha + \beta$)-titanovykh splavov* [On the influence of some technological parameters of aging on the properties of parts from hot-deformed ($\alpha + \beta$)-titanium alloys]. *Aviacionnaya promyshlennost' = Aviation industry*, 1990, no. 9, pp. 69–71.