

МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

УДК 669.295

ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОКОВОК ПСЕВДО- β -ТИТАНОВОГО СПЛАВА

Егорова Ю.Б.^{1*}, Давыденко Л.В.^{2**}, Чибисова Е.В.^{1***}, Шмырова А.В.^{3****}

¹ *Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

² *Московский политехнический университет,
ул. Б. Семеновская, 38, Москва, 107023, Россия*

³ *Научно-производственное предприятие «Аэросила»,
ул. Жданова, 6, Ступино, Московская область, 142800, Россия*

* *e-mail: egorova_mati@mail.ru*

** *e-mail: tami-davidenko@mail.ru*

*** *e-mail: echibisova@mail.ru*

**** *e-mail: shmyrovaalisa@mail.ru*

Приведены результаты статистических исследований механических свойств деформированных полуфабрикатов титанового сплава Ti-10V-2Fe-3Al на основе анализа литературных, экспериментальных и производственных данных. Установлены корреляционные связи механических свойств с химическим составом и режимами упрочняющей термической обработки. Методом регрессионного анализа получены уравнения для расчёта температуры полиморфного превращения сплава, количества первичной α -фазы после закалки и предела прочности. Выявлено, что изменения марочного состава, температуры закалки и старения определяют 10-40 % колебаний механических свойств поковок. Остальной разброс обусловлен факторами, которые не удалось выявить на основе исследованных данных.

Ключевые слова: химический состав, механические свойства, термическая обработка сплава Ti-10V-2Fe-3Al (Ti-10-2-3).

Введение

Сплав Ti-10V-2Fe-3Al (сокращенное обозначение Ti-10-2-3) — это высокопрочный псевдо- β -титановый сплав, разработанный в 80-х годах прошлого века в США, предназначенный для изготов-

ления деталей авиационного назначения (конструкций планеров самолетов, шасси, пилонов, дверей, шарниров, цапф, подшипников, деталей вертолетов и др.) и применяемый при температурах до 315 °С [1–3]. Необходимо отметить, что сплав Ti-10-2-3, в отличие от других титановых сплавов,

не имеет российских аналогов, поэтому в отечественной научной литературе практически полностью отсутствует какая-либо доступная информация, за исключением самых общих сведений, приведенных в справочниках [1, 2].

В начале 2000-х годов на ВСМПО (г. Верхняя Салда) было налажено производство слитков и деформированных полуфабрикатов из этого сплава. В настоящее время из него изготавливают товарные слитки, кованные билеты и более ста шифров штампованных поковок массой от 20 до 3200 кг [4]. Наблюдается значительное повышение качества деформированных полуфабрикатов из титановых сплавов, достигнутое за счет оптимизации состава, структуры и свойств. Это стало возможным во многом благодаря внедрению прогрессивных технологий обработки давлением, разработанных с помощью математического моделирования процессов деформирования с использованием программы DEFORM. Для прогнозирования свойств различных материалов применяют различные программные комплексы и системы, из которых наиболее распространенными являются ThermoCalc, JMatPro, ICME и др. Однако они нуждаются в существенной корректировке и адаптации к реальным условиям производства. Для этого можно успешно использовать результаты производственных испытаний и промышленного контроля, которые накоплены в больших количествах на предприятиях-производителях и предприятиях-потребителях титана [5].

Цель исследования состояла в статистической оценке возможности прогнозирования механических свойств поковок сплава Ti-10-2-3 в зависимости от химического состава и режимов термической обработки.

Исходные материалы и методика проведения исследований

Исходными данными для статистического анализа послужили сведения, опубликованные в различных литературных источниках, а также результаты экспериментов и производственных испытаний. В качестве литературных данных были использованы: уникальный по объему информации американский справочник [3], труды международных конференций по титану [6–13], монография [14], справочные издания [1, 2] и некоторые другие источники [15, 17–22]. При статистическом анализе зависимости свойств от режимов закалки и старения рассматривали данные, близкие к промышленным режимам.

Объектами исследования также послужили 1608 слитков и штампованных поковок сплава Ti-10-2-3,

изготовленных по промышленной технологии в 2007–2016 гг. Поковки были подвергнуты термической обработке, состоящей из закалки (температура нагрева 763–798 °С, выдержка 3 часа, охлаждение в воде) и старения (температура нагрева 500–515 °С, выдержка 8 часов, охлаждение на воздухе). Для статистического анализа были отобраны следующие факторы:

1. Содержание легирующих элементов и примесей, температура полиморфного превращения ($T_{ПП}$).
2. Суммарное содержание легирующих элементов и примесей, эквивалентное структурным эквивалентам по алюминию и молибдену [2]:

$$[Al]_{\text{ЭКВ}}^{\text{СТР}} = \%Al + \%Sn/3 + \%Zr/6 + 10[\%O + \%C + 2(\%N)]; \quad (1)$$

$$[Mo]_{\text{ЭКВ}}^{\text{СТР}} = \%Mo + \%V/1,4 + \%Cr/0,6 + \%Mn/0,6 + \%Fe/0,4 + \%Ni/0,8. \quad (2)$$

3. Механические свойства (условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, предел прочности σ_B , относительное удлинение δ , поперечное сужение Ψ , вязкость разрушения K_{IC}).

4. Температура нагрева под закалку T_3 , температура старения $T_{СТ}$.

Статистические исследования, проведенные с помощью пакета прикладных программ «Stadia 7», включали первичную статистическую обработку и корреляционно-регрессионный анализ по стандартным методикам [23]. Определялись следующие статистические показатели: диапазон, величина размаха, выборочное среднее, дисперсия, стандартное отклонение, коэффициент вариации; проводилась проверка нормальности распределения. Для сравнения химического состава слитков и механических свойств поковок, изготовленных в разные годы, проверялась статистическая гипотеза о равенстве математических ожиданий (выборочных средних) и дисперсий. Долю вариации свойства, которая обусловлена влиянием какого-либо фактора, оценивали с помощью показателя $\gamma = R^2 \cdot 100\%$, где R — коэффициент корреляции.

Общая характеристика сплава Ti-10-2-3 и результаты статистических исследований литературных данных

Химический состав сплава по американским спецификациям авиационного назначения AMS приведен в табл. 1. Сплав имеет довольно узкие

Таблица 1

Химический состав сплава Ti-10-2-3 по спецификациям AMS 4983, AMS 4984, AMS 4986, AMS 4987 [3]

Основные компоненты, % по массе					Примеси (не более), %				
Ti	V	Fe	Al	Y	C	O	N	H	Прочие примеси
Основа	9,0–11,0	1,6–2,2	2,6–3,4	≤0,005	0,05	0,13	0,05	0,015	0,3

регламентированные диапазоны легирования алюминием и железом, что вызывает определенные технологические трудности при выплавке слитков.

Средние типичные значения коэффициента β -стабилизации равны $k_{\beta}=1,1$, структурных эквивалентов по алюминию $[Al]_{\text{эКВ}}^{\text{СТР}}=4,0\%$ и молибдену $[Mo]_{\text{эКВ}}^{\text{СТР}}=12,1$ [2]. Содержание в сплаве β -стабилизаторов немного превышает вторую критическую концентрацию ($[Mo]_{\text{эКВ}}^{\text{СТР}}=11\%$, $k_{\beta}=1,0\%$) [2], что позволяет отнести сплав Ti-10-2-3 к классу псевдо- β -сплавов, хотя, по российской классификации, в зависимости от колебаний химического состава его можно считать сплавом переходного класса. По данным американского справочника [3], температура полиморфного превращения (ТПП) соответствует 790–805 °С (типичным считается значение 800 °С). Однако обзор опубликованных работ показывает, что ТПП может изменяться в более широ-

ком диапазоне 780–840 °С [10, с. 948-955; 11, с. 529-536; 12, с. 1164-1170, 1187-1194, 1219-1226; 13, с. 443-446, 529-536; 14; 18-20]. Для оценки ТПП можно использовать формулу, полученную на основе статистической обработки литературных данных:

$$T_{\text{ТПП}} = 890 + 22,3Al - 13,9V - 8,0Fe. \quad (3)$$

Фазовый состав сплава Ti-10-2-3 в равновесном состоянии после простого отжига представлен ~30–40% α -фазы и ~60–70% β -фазы [2, с. 53]. Параметры решётки α -фазы: $a = 0,293595$ нм, $c = 0,467454$ нм; β -фазы: $a = 0,3238$ нм [3].

Сплав обладает высокими технологическими свойствами при обработке давлением. Из него изготавливают различные виды полуфабрикатов: билеты, плиты, прутки, поковки, которые обычно используют в термически упрочненном состоянии. Для этого применяют закалку, обработку на твердый раствор или β -отжиг, после чего следует старение или перестаривание (табл. 2). Сплав Ti-10-2-3 обладает сквозной прокаливаемостью в

Таблица 2

Промышленные режимы термической обработки сплава Ti-10-2-3 [2, 3]

Спецификация	Термическая обработка	Закалка / отжиг			Старение*	
		$T, ^\circ\text{C}$	$\tau, \text{ч}$	Охлаждение	$T, ^\circ\text{C}$	$\tau, \text{ч}$
AMS 4983A	Старение для снятия напряжений	—	—	—	480–510	≥8
AMS 4984	Закалка + старение	$T_{\text{ТПП}} - (15 \pm 40) ^\circ\text{C}$	≥0,5	Вода	480–510	≥8
AMS 4986	Закалка + старение	$T_{\text{ТПП}} - (15 \pm 40) ^\circ\text{C}$	≥0,5	Вода	510–540	≥8
AMS 4987	Закалка + перестаривание	$T_{\text{ТПП}} - (15 \pm 40) ^\circ\text{C}$	≥0,5	Вода	565–620	≥8
—	Закалка + старение	730-775	1	Вода	480–540	8
—	Закалка + перестаривание	730-775	1	Вода	580–620	8
—	β -отжиг + перестаривание	815	1	Воздух	620	8

* Охлаждение на воздухе.

деталей толщиной до 125 мм и имеет значительный эффект термического упрочнения.

При повышении температуры нагрева под закалку количество α -фазы уменьшается (табл. 3) и после закалки с температур выше ТПП структура сплава представлена метастабильной β -фазой (с когерентной по отношению к матрице ω -фазой). Статистический анализ данных, обобщенных в табл. 3, показал, что количество первичной α -фазы, формирующейся в процессе закалки в интервале температур от 700 °С до ТПП, можно оценить по соотношению

$$n_{\alpha} = (0,3 \pm 0,02) \cdot (T_{\text{ПП}} - T_3), \% \quad (4)$$

В промышленных условиях применяют нагрев под закалку не до β -области, а до температур $\alpha + \beta$ -области ниже ТПП на 15–70 °С (см. табл. 2) [2, 3], так что фазовый состав после закалки представлен первичной α -фазой и метастабильной β -фазой, а после старения — первичной и вторичной α -фазами и β -фазой равновесного состава.

Количество фаз и прочностные свойства сплава в процессе старения могут как увеличиваться, так и уменьшаться в зависимости от температуры нагрева под закалку, температуры старения и длительности старения. По данным работы [10, с. 1147–

1154], после закалки (760 °С, 1ч, вода) и старения (495–520 °С, 8ч, воздух) фазовый состав сплава представлен 23–28% первичной α -фазы, 41–47% β -фазы и 30–33% вторичной α -фазы.

Старение при температурах ниже 475 °С не применяют во избежание образования ω -фазы, резко снижающей пластичность. Максимальный эффект упрочнения наблюдается после старения при температурах 480–540 °С [3]. Механические свойства поковок после стандартной термической обработки должны соответствовать требованиям, приведенным в табл. 4.

По прочности сплав Ti-10-2-3 относится к высокопрочным сплавам, комплекс механических свойств которых можно варьировать в довольно широких пределах методами термической обработки. По данным, обобщенным в справочнике [2], временное сопротивление разрыву различных полуфабрикатов из сплава Ti-10-2-3 может изменяться от 842 до 1545 МПа, относительное удлинение — от 0 до 38%, поперечное сужение — от 0 до 60%, вязкость разрушения — от 30 до 100 МПа·м^{1/2}. Путем закалки и старения можно получить довольно высокий уровень временного сопротивления разрыву (более 1550 МПа). Однако при этом почти полностью утрачиваются пластические свойства, резко падают вязкость разрушения, трещиностойкость и конструкционная прочность (табл. 5). По-

Таблица 3

Зависимость количества первичной α -фазы и метастабильной β -фазы от температуры нагрева под закалку сплава Ti-10-2-3 по литературным данным

Химический состав, % по массе						$T_{\text{ПП}}, ^\circ\text{C}$	$T_3, ^\circ\text{C}$	$n_{\alpha}, \%$	$n_{\beta}, \%$	Литература
Al	V	Fe	C	O	N					
3,2	10,3	2,2	0,016	0,15	0,009	805	700	35	65	[3, с.830]
						805	725	27	73	
						805	775	10	90	
						805	800	3	97	
						805	805	0	100	
3,12	9,98	1,74	0,010	0,120	0,0135	805	780	7	93	[10, с.948-955]
2,8	9,9	2,1	0,025	0,130	0,007	790	700	30	70	[11, с.529-536]
						790	750	15	85	
						790	820	0	100	
2,7	9,8	1,9	-	0,1	-	798	602	53	47	[13, с.443-446]
						798	652	48	52	
						798	702	30	70	
						798	752	15	85	
						798	798	0	100	

Таблица 4

Гарантированные* механические свойства штампованных поковок сплава Ti-10-2-3 при комнатной температуре [2, 3]

Нормативная документация	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %	K_{IC} , МПа·м ^{1/2}	Толщина поковки, мм
AMS 4983	1103	1240	4	факультативно	-	<25
AMS 4984	1100	1190	4		44	<75
AMS 4986	1000	1100	6		60	-
AMS 4987	895	965	8		88	-

* Приведен S-уровень (минимальное значение).

этому сплав чаще всего применяют в состоянии небольшого перестаривания.

С повышением температуры нагрева под закалку с 700 до 800–820 °С наблюдается увеличение прочностных свойств и снижение характеристик пластичности сплава, подвергнутого старению при 500 °С (табл. 5).

По данным работ [3, с. 865; 11, с. 529–536], повышение температуры на 10 °С приводит к увеличению предела прочности и условного предела текучести на ~32–46 МПа, при этом относительное удлинение снижается ~1,3–1,4 %, а поперечное сужение — на ~1,4–4,8 %. После закалки из $\alpha + \beta$ -области (с температур 750–760 °С) повышение температуры старения на 10 °С приводит к снижению предела прочности на ~13–37 МПа и повышению характеристик пластичности на ~1–2% (табл. 6).

Анализ изученных литературных источников не обнаружил каких-либо данных по влиянию колебаний марочного состава на свойства и показал, что

статистически обоснованных данных о значениях химического состава и механических свойствах различных промышленных полуфабрикатов сплава Ti-10-2-3 сравнительно немного. На основе обобщения этих работ [11, с. 1548–1552; 12, с. 470–477; 15; 17] было установлено:

1. Стандартное отклонение для основных легирующих элементов варьируется в пределах: алюминий — 0,08–0,10%, ванадий — 0,18–0,21 %; железо — 0,06–0,11%.

2. Величина «трехсигмового интервала» для основных легирующих элементов составляет: алюминий — 0,45–0,60 %, ванадий — 1,10–1,26 %; железо — 0,36–0,66 %, что соответствует ~(0,5–1,1) нормативного поля допуска.

3. Среднее содержание кислорода в слитках 0,10–0,12 %, стандартное отклонение 0,006–0,01 %, «трехсигмовый интервал» — 0,036–0,06 %.

4. Стандартное отклонение для предела прочности и условного предела текучести 20–50 МПа, от-

Таблица 5

Зависимость механических свойств сплава Ti-10-2-3 от температуры нагрева под закалку

T_3 , °С	Старение при 500°С, 1 ч* [3, стр. 865]				Старение при 500°С, 8 ч* [11, стр. 529-536]			
	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %
700	1150	1060	15,0	55,0	1151	1082	18,2	39,0
730	1450	1270	5,0	18,0	-	-	-	-
750–760	1430	1350	5,0	20,0	1432	1382	5,7	12,0
780	1550	1450	3,0	10,0	-	-	-	-
800–820	-	-	0	0	1545	1488	0,5	0
Степень изменения свойств на 10 °С	44	46	-1,3	-4,8	32	33	-1,4	-1,4
	$\frac{\text{МПа}}{^\circ\text{С}}$	$\frac{\text{МПа}}{^\circ\text{С}}$	$\frac{\%}{^\circ\text{С}}$	$\frac{\%}{^\circ\text{С}}$	$\frac{\text{МПа}}{^\circ\text{С}}$	$\frac{\text{МПа}}{^\circ\text{С}}$	$\frac{\%}{^\circ\text{С}}$	$\frac{\%}{^\circ\text{С}}$

* Охлаждение на воздухе.

Таблица 6

Зависимость механических свойств сплава Ti-10-2-3 от температуры старения

$T_{ст}^{**}$, °C	Закалка* с 750 °C [3, стр. 865]	Закалка* с 760 °C [21]		
	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %
400	-	1202	0	0
490	-	1380	5	5,7
500	1320	1353	4,4	5,7
525	1250	-	-	-
550	1050	-	-	-
575	1020	-	-	-
600	970	984	17,5	32,7
Степень изменения свойств на 10°C	$-37,2 \frac{\text{МПа}}{^\circ\text{C}}$	$-12,5 \frac{\text{МПа}}{^\circ\text{C}}$	$1,0 \frac{\%}{^\circ\text{C}}$	$1,7 \frac{\%}{^\circ\text{C}}$

* Охлаждение в воде; ** время выдержки при старении 8 ч, охлаждение на воздухе.

носительного удлинения 1,0—2,5 %, поперечного сужения — 2,0—12,0 %.

5. Величина «трехсигмового интервала» для предела прочности и условного предела текучести 156—300 МПа; относительного удлинения 6—15 %, поперечного сужения— 12,0—72,0 %.

Результаты статистических исследований зависимости механических свойств поковок сплава Ti-10-2-3 от химического состава и режимов термической обработки

Первичная статистическая обработка и корреляционно-регрессионный анализ были проведены как по каждому году выпуска, так и для всех исследованных поковок. Статистические характеристики исследованных факторов практически не зависят от года выпуска, хотя можно отметить незначительное снижение их разброса в 2015—2016 гг. В табл. 7 и 8 для примера приведены результаты

первичной статистической обработки химического состава, ТПП и механических свойств 1608 поковок.

Диапазоны изменения основных компонентов и кислорода немного выходят за поле допуска, но статистический размах («трехсигмовый интервал») соответствует величине нормативного диапазона легирования. Величина суммарных колебаний химического состава, выраженная через $[Al]_{ЭКВ}^{стр} + [Mo]_{ЭКВ}^{стр}$, составляет 2,5 %. Абсолютное изменение ТПП соответствует 30 °C.

Прочностные и пластические свойства изменяются в довольно широких пределах. Так, например, абсолютная разница между максимальным и минимальным значениями предела прочности и условного предела текучести может достигать ~260—270 МПа, стандартное отклонение — 30 МПа, что сопоставимо с литературными данными. Более вы-

Таблица 7

Статистические характеристики исследованных факторов

Статистические характеристики	V, %	Fe, %	Al, %	C, %	O, %	N, %	$T_{ПП}$, °C	T_3 , °C	T_c , °C
Требования НД	9,0-11,0	1,6-2,2	2,6-3,4	$\leq 0,05$	$\leq 0,13$	$\leq 0,05$	-	$T_{ПП} - (15-40)$	480-510
Диапазон по факту	8,84-10,42	1,46-2,11	2,84-3,62	0,005-0,045	0,082-0,149	0,001-0,013	800-830	763-798	500-515
Среднее	9,56	1,78	3,16	0,025	0,115	0,005	813	778	510
Стандартное отклонение	0,211	0,09	0,092	0,003	0,086	0,002	3,9	5,1	0,7

Примечание. Содержание H < 0,005%, Y < 0,001%.

Статистические характеристики исследованных факторов

Статистические характеристики	$[Al]_{\text{ЭКВ}}^{\text{СТР}}, \%$	$[Mo]_{\text{ЭКВ}}^{\text{СТР}}, \%$	$[Al]_{\text{ЭКВ}}^{\text{СТР}} + [Mo]_{\text{ЭКВ}}^{\text{СТР}}, \%$	$\sigma_B, \text{МПа}$	$\sigma_{0,2}, \text{МПа}$	$\delta, \%$	$\psi, \%$	$K_{Ic}, \text{МПа м}^{1/2}$
Требования НД	-	-	-	≥ 1100	≥ 1190	≥ 4	-	$\geq 44,0$
Диапазон по факту	4,15-5,2	10,2-12,6	14,7-17,1	1112-1374	1050-1317	3,4-14,2	5,7-48,4	37,5-70,64
Среднее	4,7	11,4	16,0	1267	1206	8,1	20,7	52,5
Стандартное отклонение	0,14	0,32	0,33	29,8	29,6	1,88	7,3	4,9

сокий разброс значений имеют вязкость разрушения и пластические свойства. Для этих характеристик максимальные значения в 2–8 раз выше минимальных.

На первом этапе были проанализированы парные корреляционные связи между исследуемыми факторами. Каждый элемент по отдельности или не влияет, или слабо влияет на уровень механических свойств поковок, что, скорее всего, обусловлено небольшими интервалами их изменения. Полученные данные свидетельствуют о том, что независимо от года выпуска наблюдаются слабые, но значимые тенденции увеличения прочностных свойств, снижения характеристик пластичности и вязкости

разрушения с повышением суммарного содержания легирующих элементов, примесей и, соответственно, эквивалентов по алюминию и молибдену (рис. 1).

Коэффициенты парной корреляции механических свойств с $[Al]_{\text{ЭКВ}}^{\text{СТР}}$, $[Mo]_{\text{ЭКВ}}^{\text{СТР}}$, $[Al]_{\text{ЭКВ}}^{\text{СТР}} + [Mo]_{\text{ЭКВ}}^{\text{СТР}}$ находятся в интервале от 0,15 до 0,35, а с температурой закалки и температурой старения 0,2–0,6 в зависимости от года выпуска.

На втором этапе были проанализированы множественные связи между факторами. Совместное действие легирующих элементов и примесей оказалось более существенным. Коэффициент множе-

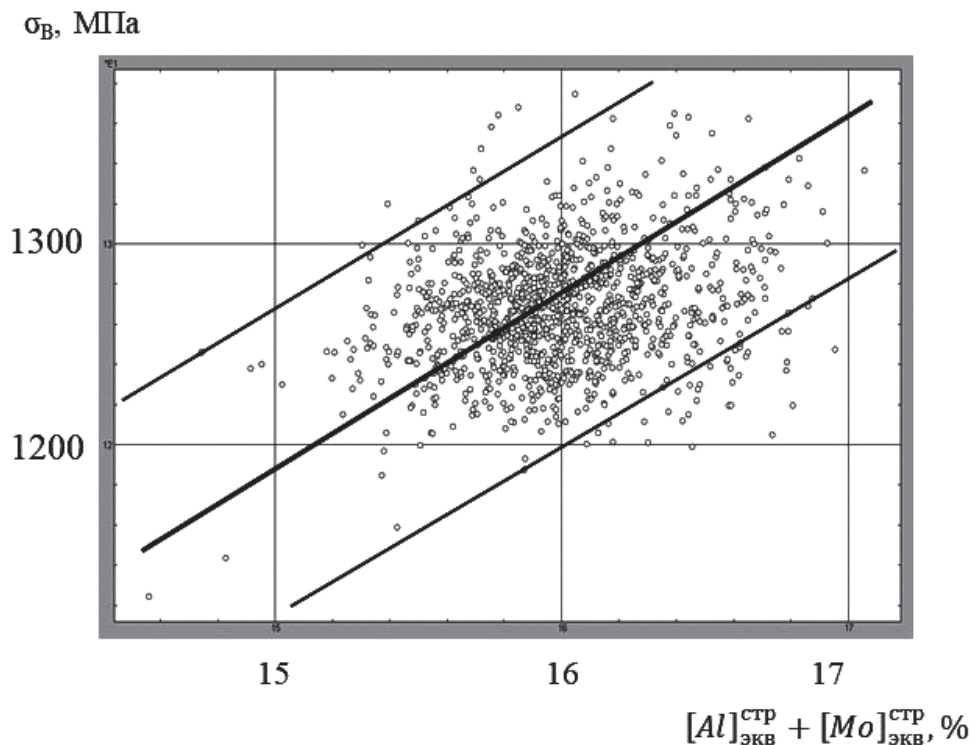


Рис. 1. Регрессионная зависимость предела прочности поковок от суммы эквивалентов по алюминию и молибдену в сплаве Ti-10-2-3 после закалки и старения

ственной корреляции равен $R = 0,3 \div 0,5$, это свидетельствует о том, что доля вариации прочности, обусловленная суммарными колебаниями химического состава, составляет $\gamma \approx 10 \div 25\%$. Множественная корреляция свойств с температурой закалки и температурой старения немного выше, коэффициенты равны $R = 0,3 \div 0,6$ в зависимости от года выпуска. Совместное влияние на свойства всех четырех факторов ($[Al]_{\text{ЭКВ}}^{\text{СТР}}$, $[Mo]_{\text{ЭКВ}}^{\text{СТР}}$, T_3 , $T_{\text{СТ}}$) еще больше: $R = 0,35 \div 0,67$, $\gamma \approx 12 \div 45\%$. Остальная доля вариации обусловлена неучтенными технологическими факторами.

Обобщенная регрессионная зависимость предела прочности поковок Ti-10-2-3 от химического состава и режимов термической обработки имеет вид:

$$\sigma_B = 1207 + (27,6 \pm 6,0)[Al]_{\text{ЭКВ}}^{\text{СТР}} + (24,1 \pm 2,7)[Mo]_{\text{ЭКВ}}^{\text{СТР}} + (1,6 \pm 0,17)T_3 - (2,5 \pm 1,24)T_{\text{СТ}} \quad (5)$$

Статистическая ошибка оценки среднего значения составляет 28 МПа. Коэффициенты регрессии, характеризующие влияние температур закалки и старения, показывают, что повышение T_3 на 10 °С приводит к увеличению предела прочности в среднем на ~15–20 МПа, а повышение $T_{\text{СТ}}$ — к сни-

жению на 15–30 МПа, что сопоставимо с литературными данными (см. табл. 5 и 6).

Колебания механических свойств могут существенно зависеть от структуры и фазового состава, во многом определяемых конкретной технологией штамповки и режимами термической обработки. В частности, температура нагрева под закалку поковок лежит ниже ТПП на 20–60 °С, так что количество первичной α -фазы, оцененное по соотношению (4), изменяется от 5 до 17 % (рис. 2). Соответственно, при уменьшении разности температур между $T_{\text{ПП}}$ и T_3 увеличение количества с 83 до 95% метастабильной β -фазы, распад которой в процессе старения обеспечивает основной эффект упрочнения, приводит к повышению прочности сплава в среднем с 1200 до 1320 МПа (рис. 3).

Структурный фактор может иметь существенное значение, так как на основе многочисленных экспериментальных данных было установлено, что титановые сплавы очень чувствительны к типу и параметрам структуры [16, 24, 25]. Основной вклад в формирование структуры вносят режимы деформации [24], однако влияние этих факторов не удалось проанализировать из-за отсутствия статистических данных.

Выводы

1. На основе статистических исследований литературных, экспериментальных и производствен-

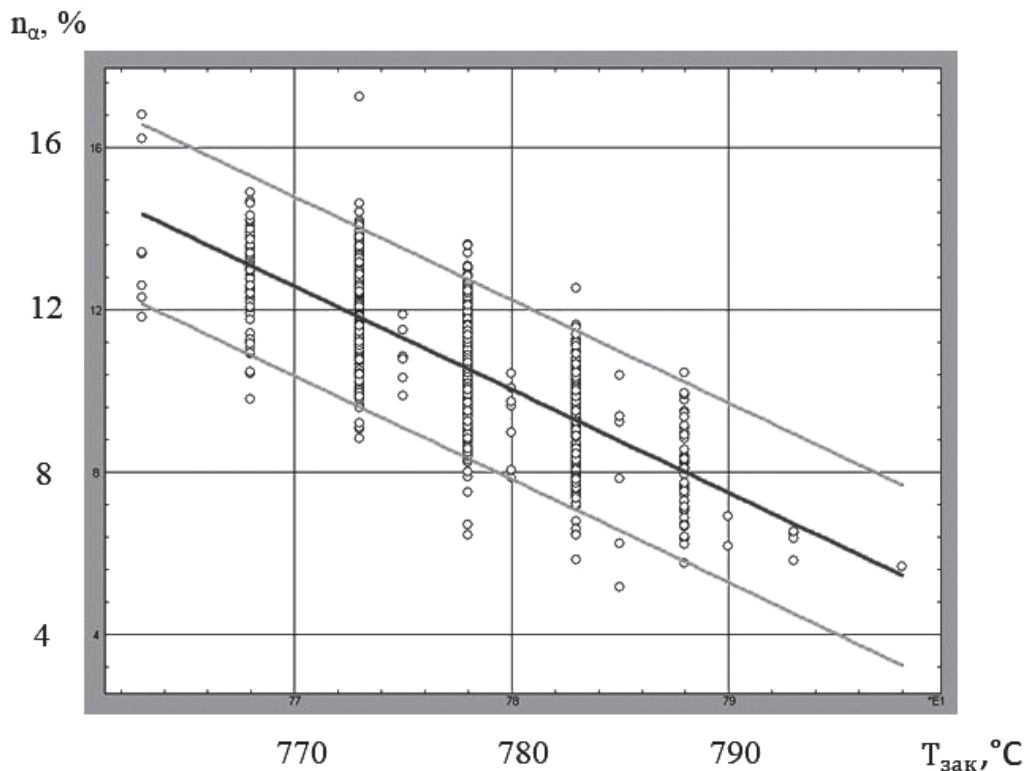


Рис. 2. Зависимость количества первичной α -фазы от температуры нагрева под закалку поковок сплава Ti-10-2-3

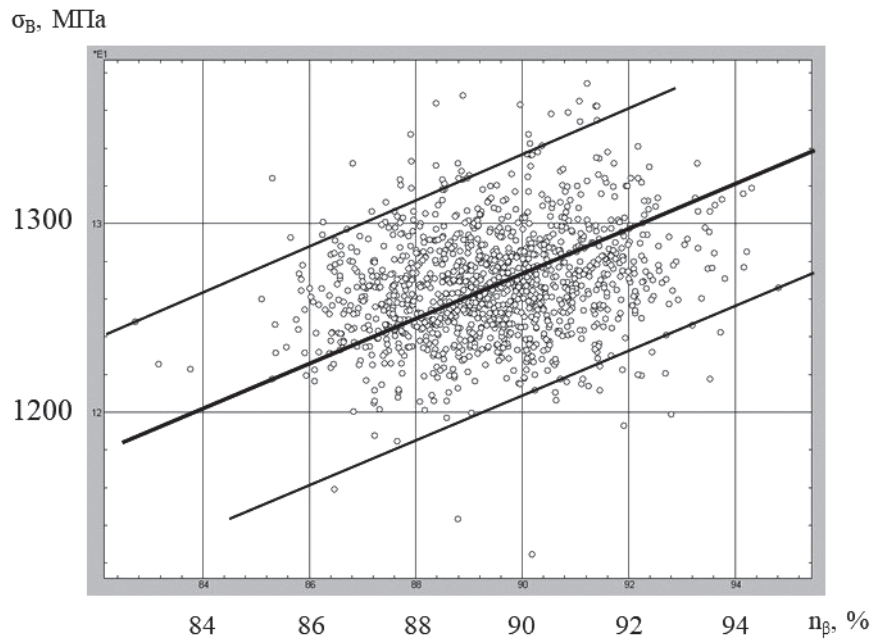


Рис. 3. Зависимость предела прочности поковок сплава Ti-10-2-3 после закалки (763–798 °С, 3 ч, вода) и старения (500–515 °С, 8 ч, воздух) от количества метастабильной β -фазы

ных данных установлены корреляционные связи механических свойств с химическим составом и режимами упрочняющей термической обработки сплава Ti-10-2-3.

2. Установлено, что изменение марочного состава, температуры закалки и старения определяют 10–40 % колебаний механических свойств поковок сплава Ti-10-2-3. Остальной разброс обусловлен факторами, которые не удалось выявить на основе исследованных данных. Одним из наиболее вероятных факторов является структура поковок, формирующаяся на стадии деформации.

Библиографический список

1. Международный транслятор современных сталей и сплавов: Справочник. В 5 т. / Под ред. В.Я. Кершенбаума. — М.: Наука и техника, 1992. Т. 3. — 650 с.
2. Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства: Справочник. — М.: ВИЛС-МАТИ, 2009. — 520 с.
3. Boyer R., Collings E.W., Welsch G. Materials Properties Handbook: Titanium Alloys. — Ohio, USA, ASM International, Materials Park, 1994. — 1176 p.
4. Кондрашов Е.Н., Ледер М.О., Русаков К.А. Исследование структуры кристаллизации сплава Ti-10V-2Fe-3Al при ВДП // Титан. 2017. № 1(55). С. 22-27.
5. Егорова Ю.Б., Уваров В.Н., Давыденко Л.В., Давыденко Р.А. Использование результатов промышленного контроля для прогнозирования механических свойств полуфабрикатов из титановых сплавов // Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov. 2017. № 6(744). С. 52-58.

6. Titanium Science and Technology: Proceedings / Edited by R.I. Jaffee and H.M. Burte. — New York, Plenum Press, 1973. Vol. 3 — pp. 1945-1956, pp. 1993-1995.
7. Титан. Metallovedeniye i tekhnologiya: Труды 3-й международной конференции по титану. — М.: ВИЛС, 1977–1978.
8. Titanium'80: Science and Technology: Proceedings of the Fourth International Conference on Titanium, Kyoto, Japan, May 19-22, 1980. Vol. 1 — pp. 469-475. Vol. 2 — pp. 1571-1581.
9. Titanium'84: Science and Technology: Proceedings of the Fifth International Conference on Titanium, FRG, Munich, 1984. Vol. 2 — pp. 1261-1267, 1307-1313.
10. Titanium'95: Science and Technology: Proceedings. 8th World Conference on Titanium, Birmingham, UK, London, 1996. Vol. 1 — pp. 948-955, 1147-1154. Vol. 2 — pp. 1243-1250, 1371-1378.
11. Titanium'99: Science and Technology: Proceedings 9th World Conference on Titanium, Saint-Petersburg, Russia, 7-11 July 1999. Vol. 1 — pp. 487-492, 529-536. Vol. 2 — pp. 1164-1170, 1187-1194, 1219-1226. Vol. 3 — pp. 1548-1552.
12. Titanium'2003: Science and Technology: Proceedings 10th World Conference on Titanium, Hamburg, Germany, 13-18 July 2003. Vol. 1 — pp. 470-477. Vol. 2 — pp. 1219-1226. Vol. 3 — pp. 1895-1902. Vol. 4 — pp. 2051-2057, 2615-2626, 2643-2653, 2713-2717. Vol. 5 — pp. 3059-3066.
13. Titanium'2007: Science and Technology: Proceedings 11th World Conference on Titanium, Kyoto, Japan, 3-7 June 2007. Vol. 1 — pp. 95-98, 443-446, 529-536, 571-575. Vol. 2 — pp. 929-932, 1255-1262, 1295-1300.
14. Yedla Natraj, Nagenswar Rao GVS, TK Nandy. Heattreatment-Microstructure and Tensile behavior of

- Ti-10V-3Fe-3Al. — Germany, Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing. 2011. — 64 p.
15. Тетюхин В.В., Левин И.В., Мусатов М.И., Пузаков И.Ю., Чечулин С.М., Таренкова Н.Ю. Гарнисажная плавка — перспективный способ производства сложнолегированных титановых сплавов // Технология легких сплавов. 2007. №4. С. 7-12.
 16. Солдатенко И.В. К вопросу о контроле качества полуфабрикатов из титановых сплавов // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. № 4. С. 189-194.
 17. Rosenberg H.W. Ti-10V-2Fe-3Al: A forging alloy development // Proceedings of the Metal Society Conference on Forging and Properties of Aerospace Materials, The Metals Society, London, 1978, pp. 279-299.
 18. Duerig T.W., Richter D.F., Albrecht J. Shape memory in Ti-10V-2Fe-3Al // Scripta Metallurgica, 1982. Vol. 16, pp. 957-961.
 19. Zhongquan D., Yuxiu C., Gaochao W., Yimin W. Study on optimizing Isothermal Forging Technological parameters of Ti-10V-2Fe-3Al by Way of Computer Programme // Advanced Technology of Plasticity. 1990. Vol. 1, pp. 279-283.
 20. Boyer R.R., Kuhlman G.W. Processing Properties relationships of Ti-10V-2Fe-3Al // Metallurgical Transactions A. 1987. Vol. 18. Issue 12, pp. 2095-2103.
 21. Toyota K., Maeda T. The Effect of Heat Treatment on the Mechanical Properties of Ti-10V-2Fe-3Al // Transactions Iron and Steel Institute of Japan. 1986. Vol. 26, pp. 814-821.
 22. Goken J., Fayed S., Skubisz P. Strain-dependent damping of Ti-10V-2Fe-3Al at room temperature // Acta Physica Polonica A. 2016. Vol. 130. No. 6, pp. 1352-1357. DOI: 10.12693/APhysPolA.130.1352
 23. Кулаичев А.П. Методы и средства комплексного анализа данных. — М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2006. — 512 с.
 24. Александров В.К., Аношкин Н.Ф., Белозеров А.П. и др. Полуфабрикаты из титановых сплавов. — М.: ВИЛС, 1996. — 581 с.
 25. Калугина М.С., Ремшев Е.Ю., Данилин Г.А., Воробьева Г.А., Пехов В.А. Комбинированный термо-акустический способ модификации структуры титанового сплава // Вестник Московского авиационного института. 2017. Т. 24. № 2. С. 185-196.

THE EFFECT OF CHEMICAL COMPOSITION AND HEAT TREATMENT ON MECHANICAL PROPERTIES OF FORGINGS FROM A PSEUDO- β -TITANIUM ALLOY

Egorova Yu.B.^{1*}, Davydenko L.V.^{2**}, Chibisova E.V.^{1***}, Shmyrova A.V.^{3****}

¹ Moscow Aviation Institute (National Research University),
MAI, 4, Volokolamskoe shosse, Moscow, A-80, GSP-3, 125993, Russia

² Moscow Polytechnic University,
38, Bolshaya Semenovskaya str., Moscow, 107023, Russia

³ Scientific-Production Enterprise «Aerosila»,
6, Zhdanova str., Stupino, Moscow region, 142800, Russia

* e-mail: egorova_mati@mail.ru

** e-mail: mami-davidenko@mail.ru

*** e-mail: echibisova@mail.ru

**** e-mail: shmyrovaalisa@mail.ru

Abstract

The article presents the results of statistical studies of mechanical properties of the deformed semi-finished products from Ti-10V-2Fe-3Al titanium alloy based on analysis of literature, experimental and commercial data, by the “Stadia 7” software package. The effect of reheat temperature for quenching T_h , as well as ageing temperature T_{ag} on mechanical properties was evaluated by method of regressive analysis of the published data. Equations for computing polymorphic transformation

temperature beta-transus temperature β_{tr} and the quantity of primary α -phase, formed while quenching process on the temperatures interval from 700 °C to β_{tr} were obtained:

$$\beta_{tr} = 890 + 22,3Al - 13,9V - 8,0Fe,$$

$$n_{\alpha} = (0,3 \pm 0,02) \cdot (\beta_{tr} - T_h), \%$$

1608 ingots and die forgings, manufactured by the industrial technology in 2007—2016 were also the

subjects of research. All forgings were subjected to thermal treatment, consisted of quenching (763–798 °C for three hours followed by water cooling) and ageing (500–515 °C for 8 hours followed by air cooling).

The following factors were selected for statistical analysis: alloying elements' and impurities' content, beta-transus temperature, alloy structural equivalents in aluminum $[Al]_{equ}^{str}$ and molybdenum $[Mo]_{equ}^{str}$, hardening temperature T_h and the aging temperature T_{ag} , the mechanical properties (offset yield strength $\sigma_{0,2}$, tensile strength σ_B , elongation δ , reduction of area ψ , fracture toughness K_{1C}). Primary statistical processing and correlation-regression analysis were performed.

Correlations between mechanical properties with deviations of the brand composition and heat treatment modes were established. At the first stage, pairwise correlations between the investigated factors were analyzed. The results of the analysis revealed that each element separately either does not affect, or affects weakly the level of mechanical properties of forgings, which is most likely stipulated by small intervals of their change. The joint action of the elements, which was evaluated by $[Al]_{equ}^{str}$ and $[Mo]_{equ}^{str}$, appeared to be more significant, the coefficient of multiple correlation was $R = 0.3 \div 0.5$, the fraction of the of the properties variation was $\gamma \approx 10 \div 25\%$. Coefficients of multiple property correlation with quenching temperature and aging temperature were equal to $R = 0,3 \div 0,6$ depending on the year of production. The joint effect on the properties of all four factors ($[Al]_{equ}^{str}$, $[Mo]_{equ}^{str}$, T_h , T_{ag}) is evaluated by the coefficients $R = 0,35 \div 0,67$, $\gamma \approx 12 \div 45\%$. The rest of the variation is stipulated by factors that could not be determined based on the data studied. The generalized regression dependence of the tensile strength of Ti-10-2-3 forgings on the chemical composition and heat treatment modes is:

$$\sigma_B = 1207 + (27,6 \pm 6,0)[Al]_{equ}^{str} + (24,1 \pm 2,7)[Mo]_{equ}^{str} + (1,6 \pm 0,17)T_h - (2,5 \pm 1,24)T_{ag}.$$

Keywords: chemical composition, mechanical properties, heat treatment of Ti-10V-2Fe-3Al (Ti-10-2-3) alloy.

References

1. Kershenbaum V. *Mezhdunarodnyi translyator sovremennykh staley i splyavov* (International translator of modern steels and alloys), Moscow, Nauka i tehnika, 1992, vol. 3 - 650 p.
2. Il'in A.A., Kolachev B.A., Pol'kin I.S. *Titanovye splyavy. Sostav, struktura, svoystva* (Titanium alloys. Composition, structure, properties), Moscow, VILS–MATI, 2009, 520 p.
3. Boyer R., Collings E.W., Welsch G. *Materials Properties Handbook. Titanium Alloys*. OH, USA, ASM International, Materials Park, 1994, 1176 p.
4. Kondrashov E.N., Leder M.O., Rusakov K.A. *Titan*, 2017, no. 1(55), pp. 22-27.
5. Egorova Yu.B., Uvarov V.N., Davydenko L.V., Davydenko R.A. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2017, no. 6, pp. 52-58.
6. *Titanium Science and Technology. Proceedings*, ed. by R.I. Jaffee and H.M. Burte, 2nd International Conference on Titanium, New York, Plenum Press, 1973, vol. 3, pp. 1945-1956, pp. 1993-1995.
7. *Titan. Metallovedenie i tekhnologiya. Trudy 3-i mezhdunarodnoi konferentsii po titanu*, Moscow, VILS, 1977-1978.
8. *Titanium'80. Science and Technology. Proceedings of the Fourth International Conference on Titanium, Kyoto, Japan, May 19-22, 1980*. Vol. 1 – pp. 469-475. Vol. 2. – pp. 1571-1581.
9. *Titanium'84. Science and Technology: Proceedings of the Fifth International Conference on Titanium, FRG, Munich, 1984*. Vol. 2 – pp. 1261-1267, 1307-1313.
10. *Titanium'95: Science and Technology: Proceedings. 8th World Conference on Titanium, Birmingham, UK, London, 1996*. Vol. 1 – pp. 948-955, 1147-1154. Vol. 2 – pp. 1243-1250, 1371-1378.
11. *Titanium'99. Science and Technology: Proceedings 9th World Conference on Titanium, Saint-Petersburg, Russia, 7-11 July 1999*. Vol. 1 – pp. 487-492, 529-536. Vol. 2 – pp. 1164-1170, 1187-1194, 1219-1226. Vol. 3 – pp. 1548-1552.
12. *Titanium'2003. Science and Technology. Proceedings 10th World Conference on Titanium, Hamburg, Germany, 13-18 July 2003*. Vol. 1 – pp. 470-477. Vol. 2 – pp. 1219-1226. Vol. 3 – pp. 1895-1902. Vol 4 – pp. 2051-2057, 2615-2626, 2643-2653, 2713-2717. Vol. 5 – pp. 3059-3066.
13. *Titanium'2007. Science and Technology. Proceedings 11th World Conference on Titanium, Kyoto, Japan, 3-7 June 2007*. Vol. 1 – pp. 95-98, 443-446, 529-536, 571-575. Vol. 2 – pp. 929-932, 1255-1262, 1295-1300.
14. Yedla Natraj, Nagenswar Rao GVS, TK Nandy. *Heattreatment-Microstructure and Tensile behavior of Ti-10V-3Fe-3Al*. Germany, Saarbrucken, LAP Lambert Academic Publishing, 2011, 64 p.
15. Tetyukhin V.V., Levin I.V., Musatov M.I., Chechulin S.M., Tarenkova N.Yu. *Tekhnologiya legkikh splyavov*, 2007, no. 4, pp. 7-12.
16. Soldatenko I.V. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2016, vol. 23, no. 4, pp. 189-194.

17. Rosenberg H.W. Ti-10V-2Fe-3Al: A forging alloy development, *Proceedings of the Metal Society Conference on Forging and Properties of Aerospace Materials*, The Metals Society, London, 1978, pp. 279-299.
18. Duerig T.W., Richter D.F., Albrecht J. Shape memory in Ti-10V-2Fe-3Al, *Scripta Metallurgica*, 1982, vol. 16, pp. 957 -961.
19. Zhongquan D., Yuxiu C., Gaochao W., Yimin W. Study on optimizing Isothermal Forging Technological parameters of Ti-10V-2Fe-3Al by Way of Computer Programme, *Advanced Technology of Plasticity*, 1990, vol. 1, pp. 279-283.
20. Boyer R.R., Kuhlman G.W. Processing Properties relationships of Ti-10V-2Fe-3Al, *Metallurgical Transactions A*, 1987, vol. 18, issue 12, pp. 2095–2103.
21. Toyama K., Maeda T. The Effect of Heat Treatment on the Mechanical Properties of Ti-10V-2Fe-3Al, *Transactions Iron and Steel Institute of Japan*, 1986, vol. 26, pp. 814-821.
22. Goken J., Fayed S., Skubisz P. Strain-dependent damping of Ti–10V–2Fe–3Al at room temperature, *Acta Physica Polonica A*, 2016, vol. 130, no. 6, pp. 1352–1357. DOI: 10.12693/APhysPolA.130.1352
23. Kulaichev A.P. *Metody i sredstva kompleksnogo analiza dannykh* (Methods and means of the complex analysis of data), Moscow, FORUM, INFRA-M, 2006, 512 p.
24. Aleksandrov V.K., Anoshkin N.F., Belozarov A.P. *Polufabrikaty iz titanovykh splavov* (Semi-finished products from titanium alloys), Moscow, VILS, 1996, 581 p.
25. Kalugina M.S., Remshev E.Yu., Danilin G.A., Vorob'eva G.A., Pekhov V.A. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2017, vol. 24, no. 2, pp. 185-196.